L22DC

savills investment management

**SAVILLS I.M. SGR S.P.A.**
Sede: Via San Paolo
20121 Milano

---

**LIN10**
Via della Costa, 2, Treviglio (BG), 24047
Edificio Ad Uso Data Center

**VALUTAZIONE IMPATTO AMBIENTALE**
ai sensi degli artt. 23-25 del D.Lgs. n.152/2006

**Piano Operativo Bonifica**

---

**Documento**
4210_ES V POB 01

**Revisione**
V.00

**Data**
Ottobre 2026

**Proprietario**
Savills I.M. SGR S.p.A

**Il Tecnico**
Dott. Geol. P. Mauri
Alvea srl

Firmato digitalmente da:
PAOLA ENRICA FIORINI
Data: 28/10/2026 12:44:16

Paolo
Francesco
Lorenzo
Mauri
27.10.2026
17:08:22
GMT+01:00

Alvea

Environment,
Your Next
Asset

Progetto: 25.070.01

**Area ex Elcograf di Treviglio**

# PROGETTO OPERATIVO DI BONIFICA DELLA ACQUE DI FALDA

Preparato per: Lombardini 22

Data: 18/06/2026

0

# Area ex Elcograf di Treviglio –Progetto Operativo di Bonifica delle acque di falda

| Rev: | data | emissione | note |
|---|---|---|---|
| 0 | 18/06/2026 | | |
| | | | |
| | | | |

| Redatto | Verificato | Approvato |
|---|---|---|
| L. Pessina | P. Mauri | P. Mauri |

## Sommario

1 INTRODUZIONE ..... 4
2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI ..... 4
2.1 Iter amministrativo ..... 4
2.2 Documentazione consultata ..... 4
2.3 Ubicazione e descrizione del sito ..... 5
2.4 Inquadramento catastale ..... 6
3 MODELLO CONCETTUALE DEFINITIVO DEL SITO ..... 7
3.1 Sintesi delle indagini ambientali eseguite ..... 7
3.1.1 Matrice terreno insaturo ..... 7
3.1.2 Matrice acque di falda ..... 7
3.2 Stato di contaminazione delle matrici ambientali ..... 8
3.2.1 Matrice terreno insaturo ..... 8
3.2.2 Matrice acque di falda ..... 8
3.3 Sorgenti primarie di contaminazione ..... 11
3.4 Sorgenti secondarie di contaminazione ..... 11
3.4.1 Matrice terreno insaturo ..... 11
3.4.2 Matrice acque di falda ..... 12
3.5 Percorsi di migrazione della contaminazione ..... 12
3.6 Caratterizzazione idrogeologica del sito ..... 13
4 ANALISI DI RISCHIO ..... 14
5 ADEGUAMENTO DEL SISTEMA DI MESSA IN SICUREZZA DELLA FALDA ..... 15
5.1 Test idraulici effettuati ..... 15
5.2 Modello idrogeologico di flusso ..... 16
5.2.1 Impostazione del modello ..... 16
5.2.2 Risultati del modello in modalità statica ..... 18
5.2.3 Inserimento pozzi barriera e simulazione di progetto ..... 20
5.3 Implementazione dell'impianto di pump & treat ..... 22
5.3.1 Pozzi barriera ..... 22
5.3.2 Rete di mandata delle acque ..... 23
5.3.3 Impianto TAF ..... 23
6 PROGETTO OPERATIVO DI BONIFICA ACQUE DI FALDA ..... 25
6.1 Obiettivi di bonifica ..... 25

6.2 Criteri di scelta della tecnologia di bonifica ..... 25
6.2.1 Analisi comparativa e scelta della tecnologia di bonifica ..... 25
6.2.2 Principi biochimici della riduzione del Cromo VI ..... 26
6.2.3 Casi studio di successo e riferimenti normativi ..... 28
6.2.4 Compatibilità della tecnologia con l'assetto idrogeologico del sito ..... 29
6.3 Test operativo di ottimizzazione ..... 29
6.3.1 Obiettivi della fase di taratura ..... 29
6.3.2 Modalità di svolgimento del test pilota ..... 30
6.3.3 Protocollo di monitoraggio ..... 30
6.3.4 Taratura del sistema full-scale ..... 30
6.4 Dimensionamento e specifiche tecniche degli interventi ..... 31
6.4.1 Schema funzionale del sistema a ricircolo e layout preliminare ..... 31
6.4.2 Calcolo del volume d'acqua e portate di progetto ..... 32
6.4.3 Stima del fabbisogno di siero di latte e calcolo del dosaggio teorico ..... 33
6.4.4 Ubicazione e caratteristiche dei pozzi di iniezione ..... 34
6.4.5 Dimensionamento e caratteristiche dell'impianto ..... 35
6.4.6 Layout e P&I dell'impianto ..... 36
6.5 Piano di monitoraggio ..... 37
6.5.1 Monitoraggio impiantistico ..... 37
6.5.2 Monitoraggio delle acque di falda ..... 38
6.5.3 Rendicontazione monitoraggi ..... 39
6.6 Cronoprogramma ..... 39
6.7 Computo metrico estimativo ..... 0



**Tavole**:

1. Layout dell'impianto
2. P&I

**Allegati**:

1. Analisi di Rischio sito-specifica (ambiente srl, febbraio 2026)
2. Report della campagna di monitoraggio delle acque di falda di gennaio 2026 (ambiente srl, febbraio 2026)
3. Realizzazione prova di pompaggio (ambiente srl, febbraio 2026)

## Disclaimer

With this document, Alvea srl has fulfilled the commission entrusted to it by L22 with the required diligence.

The calculations and results illustrated in this document have been obtained in compliance with current regulations and recognised rules in the sector of operation and are based on the state of knowledge at the time of writing the report.

In this regard, Alvea srl has prepared this documentation in accordance with the information and specifications provided by the Client, who therefore assumes all responsibility for the accuracy and correctness of the same.



To this end, Alvea srl considers that:

- the client, or third parties designated by them, have provided all the correct information and complete documents for the execution of the commission.
- this document will not be used in a partial manner.
- the processing and results contained in this document will not be used for any purpose other than that agreed upon or for any other purpose, nor will they be transposed to modified circumstances without being re-examined.
- in this document, the term “Client” refers to the company “L22” which has commissioned “Alvea” to draft this document.

Con il presente documento, Alvea srl ha eseguito l'incarico affidatole da L22 con la dovuta diligenza.

I calcoli e i risultati illustrati nel presente documento sono stati ottenuti nel rispetto delle normative vigenti e delle regole riconosciute nel settore di attività e si basano sullo stato delle conoscenze al momento della stesura del rapporto.

A tal proposito, Alvea srl ha redatto la presente documentazione in conformità alle informazioni e alle specifiche fornite dal Cliente, che pertanto si assume ogni responsabilità in merito all'accuratezza e alla correttezza della stessa.

A tal fine, Alvea srl considera che:

- il Cliente, o terzi da lui designati, abbiano fornito tutte le informazioni corrette e la documentazione completa per l'esecuzione dell'incarico.
- il presente documento non verrà utilizzato in modo parziale.
- le elaborazioni e i risultati contenuti nel presente documento non verranno utilizzati per scopi diversi da quelli concordati o per qualsiasi altro scopo, né verranno trasposti a circostanze modificate senza essere riesaminati.
- nel presente documento, il termine “Cliente” si riferisce alla società “L22” che ha incaricato “Alvea” di redigere il presente documento.

# 1 INTRODUZIONE

Il seguente documento costituisce il Progetto Operativo di Bonifica delle acque di falda del sito "ex Elcograf" di via della Costa, 2 a Treviglio (BG), redatto per Lombardini 22 S.p.A. che opera per conto di Savills Investment Management SGR S.p.A., in nome e per conto del Fondo Nector, proprietario dell'immobile a partire dal 27/12/2024.

Il progetto è stato elaborato a seguito dei risultati del Piano di Caratterizzazione del sito, approvato con Decreto Dirigenziale prot. n. 9962 del 12/02/2025.



# 2 INQUADRAMENTO GENERALE E OBIETTIVI

## 2.1 Iter amministrativo

Di seguito si riporta l'iter amministrativo relativo al procedimento di bonifica ex titolo V parte IV del D.Lgs.152/06:

- Comunicazione ai sensi dell'art. 245 del D.Lgs. 152/2006 trasmessa in data 07/09/2024 dalla società Elcograf SpA, in qualità di soggetto non responsabile proprietario del sito, della potenziale contaminazione rilevata nelle acque sotterranee;
- Trasmissione in data 09/12/2024 da parte della società Elcograf SpA del Piano di Caratterizzazione Ambientale;
- Approvazione con Decreto Dirigenziale prot. N.9962 del 12/02/2025 da parte del Comune di Treviglio del Piano di Caratterizzazione Ambientale;
- Voltura del Piano di Caratterizzazione Ambientale alla società Savills Investment Management SGR S.p.A., in nome e per conto del Fondo Nector, in qualità di nuovo proprietario dell'area a partire dal 27/12/2024;
- Istanza di autorizzazione allo scarico delle acque di MISE della falda nella Roggia Firone, trasmessa dalla società Savills Investment Management SGR S.p.A., in nome e per conto del Fondo Nector, in data 20/06/2025;
- Autorizzazione allo scarico delle acque di MISE della falda nella Roggia Firone, con Determinazione Dirigenziale della Provincia di Bergamo n.2845 del 17/10/2025;
- Le attività di caratterizzazione sono state avviate ad aprile 2025 e hanno previsto la realizzazione di n.4 campagne di monitoraggio, effettuate nei mesi di aprile, giugno, agosto e ottobre 2025, di cui n.3 campagne eseguite in contraddittorio con ARPA (aprile, agosto e ottobre).

## 2.2 Documentazione consultata

Per la stesura del presente documento è stata consultata la seguente documentazione:

- Piano di Caratterizzazione Ambientale presentato in data 09/12/2024 dalla società Elcograf SpA, a firma del Geol. Stefano Fassini di Consulenze Ambientali S.p.A.;

- Esiti delle attività di monitoraggio delle acque di falda aprile, giugno, agosto ed ottobre 2025 a cura di ambiente spa (aprile e giugno) ed ambiente S.r.l. (agosto-ottobre 2025).

## 2.3 Ubicazione e descrizione del sito

Il Sito è localizzato nel settore sud-ovest del territorio comunale di Treviglio (BG), ai margini dell'area industriale ricompresa tra il tracciato della linea ferroviaria e l'Autostrada A35, come rappresentato nella figura seguente.

*Figura 1 - Ubicazione dell'area*

Il sito è stato interessato dalle attività produttive della ditta Eurogravure a partire dagli anni 2000, successivamente acquisito da Elcograf, per attività di stampa di prodotti editoriali e/o commerciali mediante metodo a rotocalco.

La società Elcograf ha comunicato in data 15/02/2024 la cessazione di ogni attività produttiva a partire dal 01/01/2024. L'area è stata successivamente ceduta, in data 27/12/2024, alla società Savills Investment Management SGR S.p.A., in nome e per conto del Fondo NEctor, per la realizzazione di un Data Center.

## 2.4 Inquadramento catastale

Il sito insiste sui mappali 14692, 14845, 14374,14368, 14645, 14370 e 14376 - foglio 9 del Catasto Terreni. La seguente figura riporta l'ubicazione del sito sulla mappa catastale estratta dal Geoportale di Regione Lombardia.

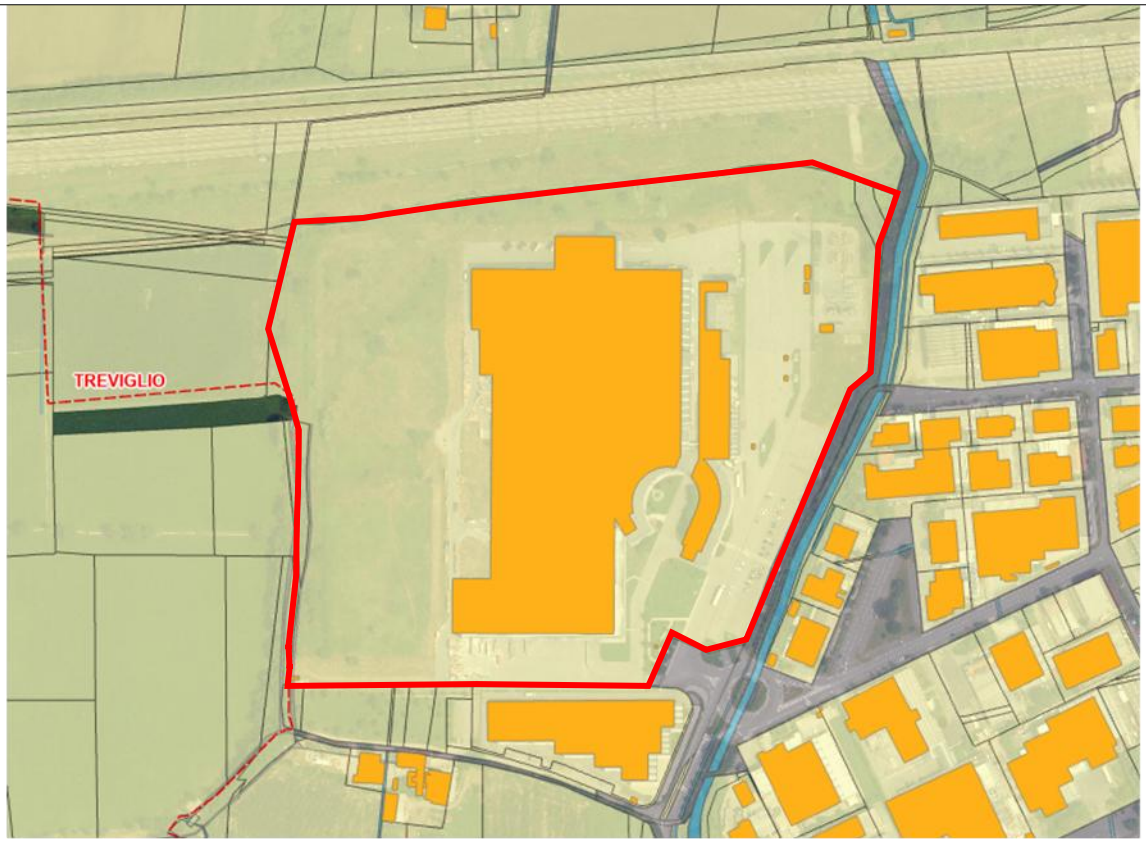



*Figura 2 - Inquadramento catastale*

# 3 MODELLO CONCETTUALE DEFINITIVO DEL SITO

## 3.1 Sintesi delle indagini ambientali eseguite

Per una disamina completa delle attività di indagine ambientale eseguite sul sito si rimanda al documento di Analisi di Rischio presentato in allegato e alla restante documentazione agli Atti.

Di seguito si riporta una sintesi delle indagini realizzate e dei risultati ottenuti.



### *3.1.1 Matrice terreno insaturo*

Sono state eseguite le seguenti attività di indagine ambientale sulla matrice suolo insaturo:

- Luglio 2024: Piano di indagini eseguito dalla società acquirente (Savills Investment Management SGR S.p.A.) nell'ambito dell'acquisizione del sito, mediante la realizzazione di:
  - N.23 sondaggi spinti fino a 2m da p.c. con prelievo di n.2 campioni per ciascun punto;
  - N. 2 sondaggi inclinati al di sotto dei serbatoi di solventi con prelievo di 10 campioni;
- Ottobre 2024: Piano di indagine ambientale preliminare eseguito da Elcograf in contraddittorio con ARPA nell'ambito della cessazione dell'AIA, mediante la realizzazione di n.22 sondaggi spinti fino a 3m da p.c. e prelievo di 41 campioni di terreno per analisi di laboratorio;
- Ottobre 2024: Indagini effettuate da Elcograf nell'ambito degli approfondimenti per la ricerca della sorgente di contaminazione da Cromo VI, mediante il campionamento dei terreni sottostanti ai pozzi perdenti;
- Settembre 2025: Indagini effettuate da ambiente srl, per conto di Savills Investment Management SGR S.p.A., nell'ambito della realizzazione di n.7 piezometri di monitoraggio della falda, mediante il prelievo di n.4 campioni di terreno insaturo per ciascun punto di indagine per un totale di n.28 campioni sottoposti ad analisi di laboratorio.

### *3.1.2 Matrice acque di falda*

Sono state eseguite le seguenti attività di indagine ambientale sulla matrice acque di falda:

- Luglio 2024: Piano di indagini eseguito dalla società acquirente (Savills Investment Management SGR S.p.A.) nell'ambito dell'acquisizione del sito, mediante la realizzazione di n.6 piezometri (PZ1÷PZ6) e di una campagna di monitoraggio delle acque di falda, realizzata in contraddittorio con ARPA;
- Agosto 2024: Ripetizione del monitoraggio nel piezometro PZ1 a seguito del rinvenimento di un superamento dei limiti di legge per il parametro Cromo VI;
- Da settembre a novembre 2024: Realizzazione di piezometri integrativi da parte di Elcograf (PZ7÷PZ13) e di ulteriori 5 campagne di monitoraggio delle acque di falda (in data 05/09, 27/09, 16/10, 25/10, 21/11), di cui quella del 27/09 realizzata in contraddittorio con ARPA;
- Aprile 2025: Realizzazione della prima campagna di monitoraggio delle acque di falda prevista da Piano di Caratterizzazione, realizzata in contraddittorio con ARPA;
- Maggio 2025: Realizzazione di monitoraggio integrativo presso il piezometro PZ1;

- Giugno 2025: Realizzazione della seconda campagna di monitoraggio delle acque di falda prevista da Piano di Caratterizzazione;
- Agosto 2025: Realizzazione della terza campagna di monitoraggio delle acque di falda prevista da Piano di Caratterizzazione, realizzata in contraddittorio con ARPA;
- Settembre 2025: Realizzazione di ulteriori n.7 piezometri (PZ14÷PZ20) e di una campagna di monitoraggio integrativa sulla rete piezometrica completa;
- Ottobre 2025: Realizzazione della quarta campagna di monitoraggio delle acque di falda prevista da Piano di Caratterizzazione, realizzata in contraddittorio con ARPA;
- Gennaio 2026: Realizzazione di un'ulteriore campagna di monitoraggio delle acque di falda finalizzata alla definizione del Progetto Operativo di Bonifica. Gli esiti di quest'ultima campagna sono illustrati nel documento allegato alla presente.



## 3.2 Stato di contaminazione delle matrici ambientali

### *3.2.1 Matrice terreno insaturo*

Tutti i campioni di terreno prelevati nell'ambito delle diverse campagne di indagini condotte presso il sito hanno mostrato concentrazioni inferiori alle CSC di Tab.1 Col.B Allegato V Titolo V Parte IV del D.Lgs.152/06.

Con particolare riferimento al parametro Cromo VI, si segnala che le concentrazioni registrate sono sempre inferiori anche ai limiti di cui alle CSC di Tab.1 Col.A Allegato V Titolo V Parte IV del D.Lgs.152/06 per siti ad uso residenziale (pari a 2 mg/kg).

### *3.2.2 Matrice acque di falda*

I monitoraggi eseguiti hanno mostrato la presenza di **Cromo VI** nella porzione sud-orientale del sito (piezometri PZ VALLE, PZ1, PZ13, PZ10, PZ11, PZ12, PZ9), circoscritta mediante l'esecuzione dei piezometri integrativi di settembre 2025.

La contaminazione interessa un areale di estensione massima di circa 10.000 mq, con concentrazioni di Cromo VI che, nel 2025, si sono mantenute entro gli stessi ordini di grandezza, con tenori nell'ordine massimo delle decine di µg/l, a fronte di una CSC di 5 µg/l.

La presenza di Cromo VI non interessa sempre tutti i piezometri indicati, ma risulta variabile nel tempo: ad esempio, a settembre 2025 i piezometri contaminati risultavano PZ VALLE, PZ1, PZ13, PZ9, a ottobre 2025 PZ1, PZ9, PZ11, PZ13, a gennaio 2026 le concentrazioni sono risultate inferiori alla CSC in tutti i punti monitorati. L'andamento della contaminazione risulta variabile nel tempo in ciascun punto, con oscillazioni non sempre sincrone tra i vari punti di monitoraggio (valori massimi nel 2025 registrati tra i mesi di aprile e agosto). In considerazione di ciò***, come illustrato in seguito, i monitoraggi periodici proseguiranno e gli interventi di bonifica saranno attivati solo all'effettivo manifestarsi della contaminazione.***

Nelle figure seguenti si indica l'ubicazione dei piezometri che hanno mostrato superamenti per il cromo VI, e l'andamento storico delle concentrazioni in ciascun punto.

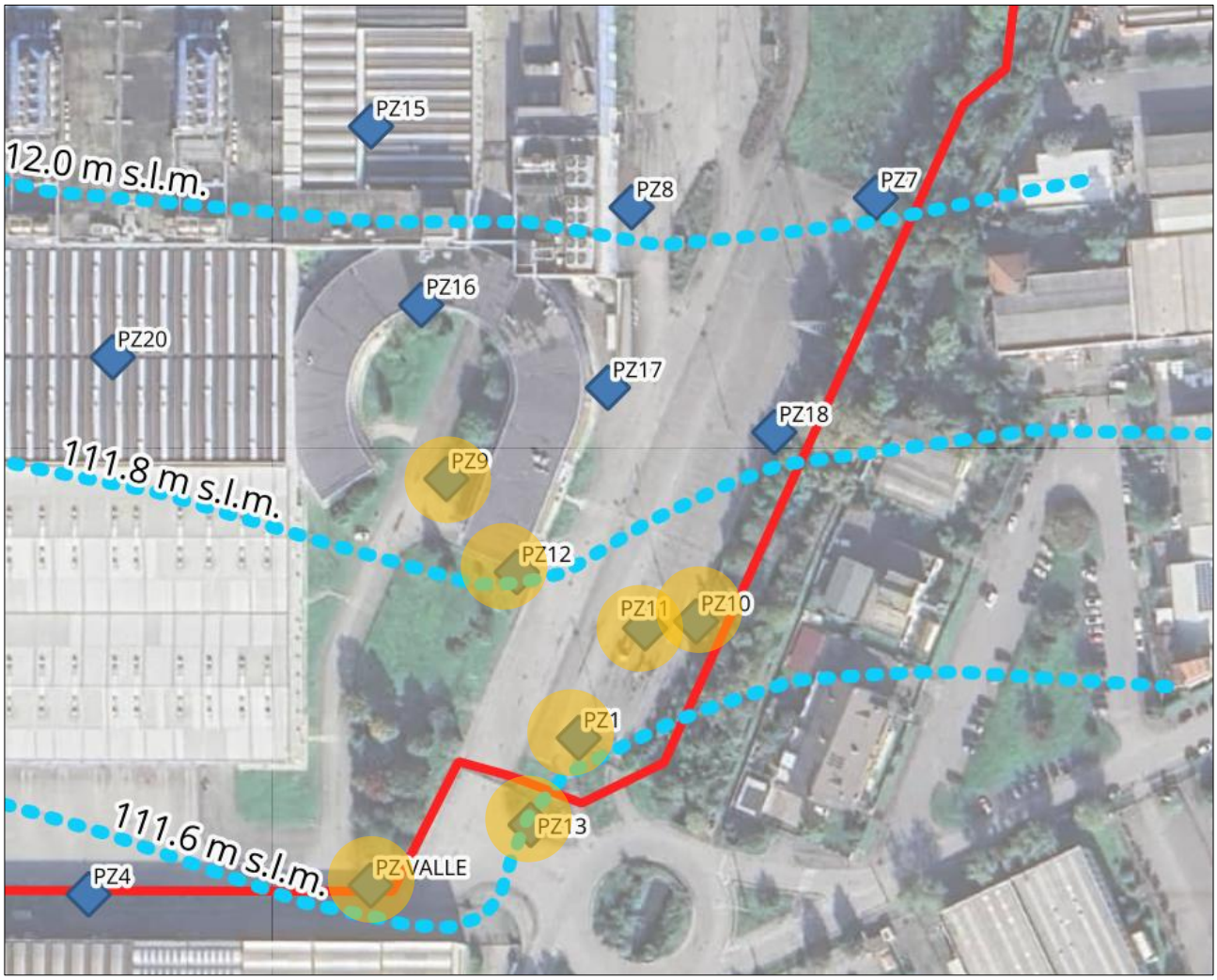
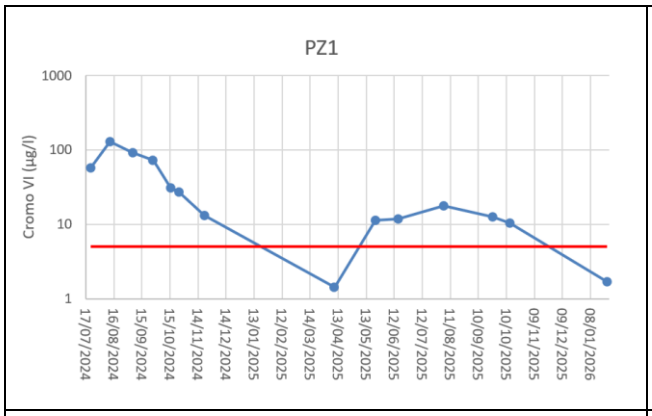
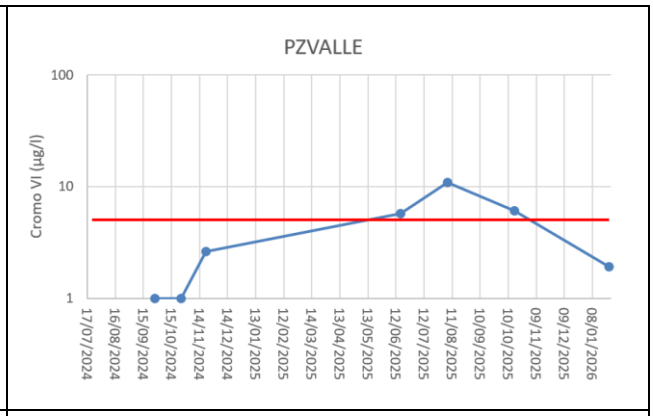
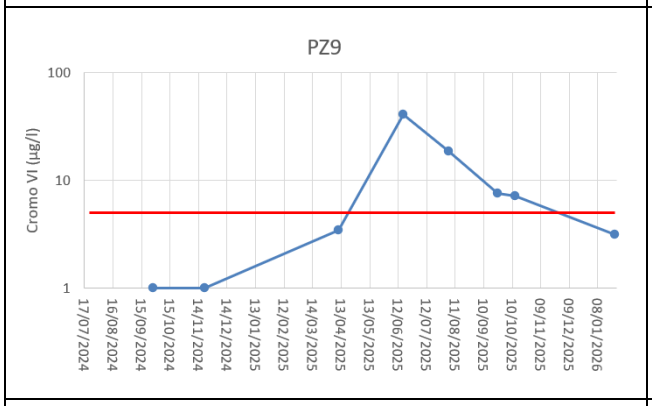
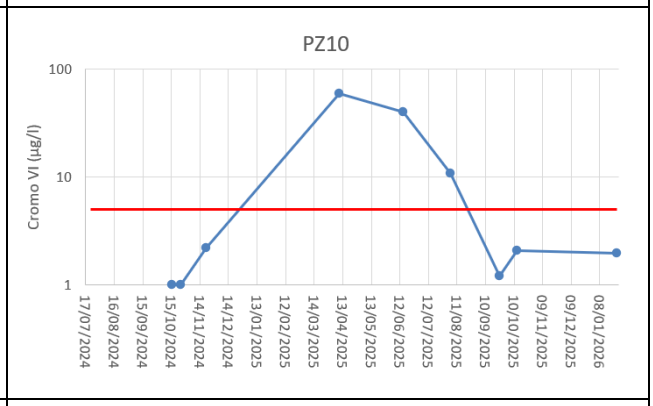


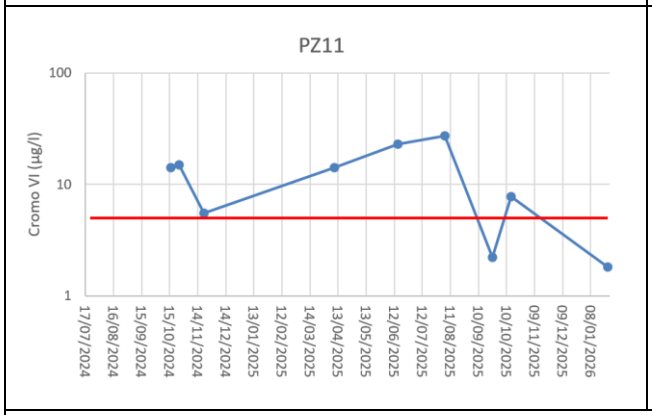

*Figura 3 – Ubicazione piezometri con rinvenimento di Cromo VI*

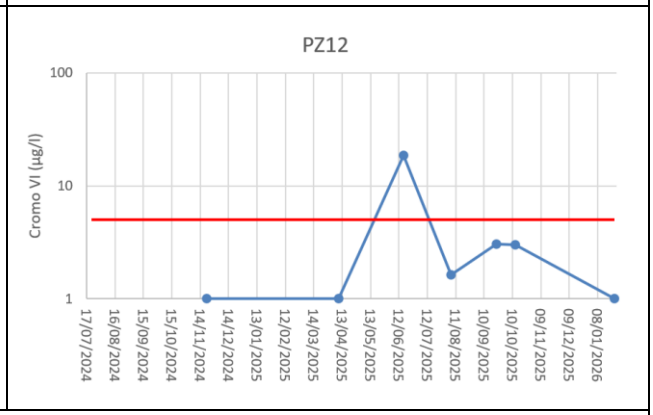

PZ1
Cromo VI (µg/l)
1000
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026

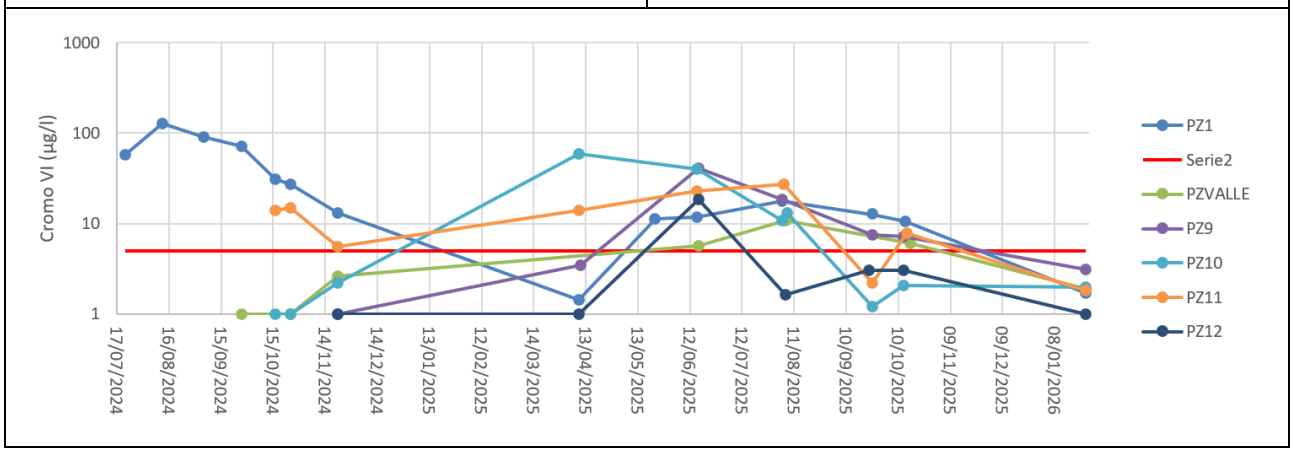

PZVALLE
Cromo VI (µg/l)
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026


PZ9
Cromo VI (µg/l)
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026


PZ10
Cromo VI (µg/l)
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026


PZ11
Cromo VI (µg/l)
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026


PZ12
Cromo VI (µg/l)
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026


Cromo VI (µg/l)
1000
100
10
1
17/07/2024
16/08/2024
15/09/2024
15/10/2024
14/11/2024
14/12/2024
13/01/2025
12/02/2025
14/03/2025
13/04/2025
13/05/2025
12/06/2025
12/07/2025
11/08/2025
10/09/2025
10/10/2025
09/11/2025
09/12/2025
08/01/2026
PZ1
Serie2
PZVALLE
PZ9
PZ10
PZ11
PZ12

Relativamente agli altri contaminanti, è da segnalare che nelle prime campagne di monitoraggio eseguite (anno 2024), risultavano sporadici e lievi superamenti dei limiti per alcuni **solventi clorurati** (cloroformio, tetracloroetilene, tricloroetilene), non rilevati nelle campagne di monitoraggio successive.

Inoltre, nel monitoraggio di settembre 2024 ARPA segnalava la presenza di **Molibdeno** in PZ1 con concentrazione di 167 µg/l, prescrivendo di ricercare il parametro nelle campagne di monitoraggio previste dal Piano di Caratterizzazione. I risultati dei monitoraggi successivi hanno evidenziato concentrazioni di Molibdeno al più dell'ordine di qualche decina di µg/l, nei medesimi areali del sito dove è rinvenuto il cromo VI (concentrazioni >20 µg/l sono state registrate solo nei piezometri PZ1, 10, 11 e 13). Il Molibdeno non è un parametro per cui è previsto un limite normativo nell'ambito delle bonifiche dei siti contaminati (CSC d Tab.2 D.Lgs.152/06); tuttavia, prendendo come valore di riferimento il limite considerato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), pari a 70 µg/l (*Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition*), si evidenzia che i dati rilevati nei monitoraggi periodici eseguiti nel corso del 2025 hanno mostrato **concentrazioni di molibdeno sempre inferiori a tale limite**. Si segnala unicamente un valore del tutto sovrapponibile al limite stesso (70,1 µg/l) registrato da ARPA a ottobre 2025 in PZ11; nella successiva campagna effettuata a gennaio 2026 la concentrazione è scesa a 27 µg/l.



Relativamente al riscontro sull'eventuale uso del molibdeno dei processi produttivi aziendali, come richiesto nel verbale di conferenza dei servizi di approvazione del Piano di Caratterizzazione, si trasmette in allegato la nota trasmessa dalla società Elcograf in data 26/02/2026, nella quale è riportato che "*avendo verificato le schede tecniche e di sicurezza dei prodotti utilizzati nei cicli produttivi e tecnologici svolti presso lo stabilimento di Treviglio, via della Costa 2, non abbiamo ritrovato indicazioni della presenza del componente Molibdeno*".

## 3.3 Sorgenti primarie di contaminazione

Non risulta la presenza di sorgenti primarie di contaminazione.

## 3.4 Sorgenti secondarie di contaminazione

### *3.4.1 Matrice terreno insaturo*

Come riportato al paragrafo 3.2.1, nell'ambito delle campagne di indagine eseguite sulla matrice terreno insaturo, le concentrazioni dei contaminanti ricercati sono sempre risultate inferiori alle CSC di Tab.1 Col.B Allegato V Titolo V Parte IV del D.Lgs.152/06; pertanto, non risulta la presenza di sorgenti secondarie di contaminazione nella matrice terreno insaturo.

Con particolare riferimento al parametro Cromo VI, le approfondite attività di indagine condotte sul sito (sondaggi geognostici, verifiche e campionamenti mirati in corrispondenza dei centri di pericolo storici) hanno evidenziato l'assenza di terreni con concentrazioni del parametro superiori alle CSC industriali. Ciò può apparire in contrasto con la persistenza di concentrazioni stazionarie di Cromo VI nelle acque di falda, pur dell'ordine di poche decine di µg/l. Tuttavia, il fenomeno della "sorgente fantasma" può trovare giustificazione nei seguenti fattori:

- Elevata mobilità e lisciviazione storica: data l'elevata permeabilità dei terreni (prevalentemente ghiaioso-sabbiosi), gli stessi sono caratterizzati da un ridotto adsorbimento dei contaminanti. Pertanto, la massa principale della contaminazione è probabilmente già migrata verso la falda, e quella che eventualmente permane nel terreno è una frazione residuale debolmente adsorbita sulla superficie dei grani, o intrappolata in lenti a minor permeabilità.
- Coefficiente di distribuzione: il Cromo VI presenta un coefficiente di distribuzione (Kd) estremamente basso in matrici grossolane, è cioè caratterizzato da un'affinità molto bassa per la fase solida ed elevata mobilità in falda. I dati analitici sito-specifici mostrano valori di concentrazione di Cromo VI nel terreno generalmente compresi tra 0,1 e 0,5 mg/kg, tenori coerenti con le concentrazioni disciolte riscontrate in falda (dell'ordine delle decine di µg/l).



Inoltre, l'**assenza di rilasci ad impulsi** indica che la contaminazione riscontrata in falda è governata da processi di rilascio lento verso la fase liquida.

Alla luce di quanto sopra, è possibile presumere che la contaminazione riscontrata in falda sia da riferirsi a una "coda" residua legata a una sorgente nei terreni insaturi ormai in massima parte esaurita e probabilmente diffusa, verosimilmente caratterizzata allo stato attuale da concentrazioni di Cromo VI, calcolate sulla sostanza secca, al più di pochi mg/kg (<CSC), ma comunque in grado di determinare le concentrazioni di cromo VI rilevate in falda. È, pertanto, ragionevole supporre che non vi sia una sorgente localizzata (che, altrimenti, genererebbe concentrazioni in falda di diversi ordini di grandezza superiori), ma che sebbene i terreni presentino concentrazioni ampiamente inferiori alle CSC (che non richiedono, quindi, interventi di bonifica), essi agiscano come una matrice di accumulo residuale in equilibrio con la fase disciolta, costituendo il serbatoio che alimenta con continuità il pennacchio disciolto.

Tale evidenza sposta l'efficacia dell'intervento di bonifica direttamente sulla matrice acquosa, unico comparto dove la contaminazione risulta eccedere i limiti normativi.

In considerazione di quanto sopra, si ritiene che la ricerca di una sorgente nel terreno insaturo non costituisca una strategia efficace e che la bonifica del sito debba prevedere un intervento diretto sulla fase liquida, mirato a interrompere il meccanismo di rilascio tramite la stabilizzazione chimico-biologica del Cromo VI in situ.

### *3.4.2 Matrice acque di falda*

La sorgente secondaria di contaminazione nelle acque di falda è costituita dalle acque che presentano concentrazioni di Cromo VI eccedenti il limite di legge.

## 3.5 Percorsi di migrazione della contaminazione

L'unico percorso attivo di migrazione della contaminazione è costituito dal trasporto in falda, considerato che il contaminante in esame è non volatile e che, pertanto, non presenta una migrazione per via aerea.

Dal momento che la contaminazione raggiunge il punto di conformità del sito (POC) costituito dal limite di valle idrogeologico dell'area di proprietà (perimetro sud dell'ex stabilimento industriale), nel mese di ottobre

2025 è stato attivato il sistema di messa in sicurezza di emergenza (MISE) della falda, installato nel piezometro PZ1, al fine di intercettare il pennacchio contaminato impedendone la propagazione al di fuori del confine del sito. Nel proseguo del documento, è proposta l'implementazione del sistema di messa in sicurezza definitivo della falda, al fine di ottimizzarne l'efficacia.

## 3.6 Caratterizzazione idrogeologica del sito



L'assetto idrogeologico dell'area è stato definito mediante l'integrazione dei dati derivanti dai sondaggi geognostici e dalle prove idrauliche eseguite in sito nell'ambito del dimensionamento del sistema di messa in sicurezza della falda (prove di pompaggio, vedi documento allegato).

Il sito è caratterizzato da un acquifero monostrato di tipo libero, ospitato in una matrice alluvionale prevalentemente grossolana (ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose con rare lenti limose). La base dell'acquifero è stimata a una profondità di circa 50m dal p.c., in coerenza con i dati di pozzo riportati nel PGT del Comune di Treviglio. Il livello statico della falda si attesta mediamente a circa 10 m dal p.c.

Sulla base delle prove effettuate, sono stati determinati i seguenti parametri medi:

- Conducibilità idraulica (k): 2,1E-4 m/s
- Gradiente idraulico (i): 2,5 per mille

L'elevata trasmissività dell'acquifero spiega la rapida migrazione della contaminazione storica e supporta il Modello Concettuale descritto nei paragrafi precedenti.

# 4 ANALISI DI RISCHIO

In allegato a questo documento è prestata l'Analisi di Rischio del sito redatta da ambiente srl ai sensi dell'art.242 D.Lgs.152/06.

Alla luce del modello concettuale del sito, l'Analisi di Rischio è stata sviluppata per la sorgente secondaria di contaminazione riscontrata in falda caratterizzata dalla presenza di concentrazioni di Cromo VI superiori al limite di legge. In considerazione della natura non volatile del contaminante, l'Analisi di Rischio è stata sviluppata unicamente per la via di esposizione di trasporto in falda e, dal momento che sono riscontrati superamenti delle CSC al punto di conformità (condizione POC=0), la CSR per il Cromo VI è posta pari alla CSC (5 µg/l).

Si rimanda al documento in allegato per tutti i dettagli del caso.

# 5 ADEGUAMENTO DEL SISTEMA DI MESSA IN SICUREZZA DELLA FALDA

In considerazione dei superamenti registrati in falda al punto di conformità, a partire da ottobre 2025 è attivo il sistema di messa in sicurezza di emergenza della falda (MISE) costituito dall'emungimento in corrispondenza del piezometro PZ1 di una portata pari a 1 litro/secondo. Le acque emunte vengono trattate in un impianto modulare montato su skid avente una sezione di filtrazione a sabbia ed una sezione a resine per l'abbattimento della contaminazione da Cromo VI prima dello scarico in corso d'acqua superficiale (Roggia Firone), ai sensi dell'autorizzazione allo scarico resa dalla Provincia di Bergamo con Determinazione Dirigenziale n.2845 del 17/10/2025.



Alla luce degli ulteriori superamenti riscontrati, recentemente, anche nel piezometro PZ VALLE anch'esso ubicato al punto di conformità del sito, si è proceduto ad effettuare approfondimenti specifici per dimensionare l'opera di sbarramento in maniera tale da garantirne l'efficacia per l'intercettazione della contaminazione in uscita dal sito.

In allegato alla presente si riporta il report, redatto da ambiente srl, illustrante i test idraulici effettuati al fine di effettuare il dimensionamento definitivo della barriera idraulica. Nei paragrafi seguenti si riassumono i risultati dei test idraulici ed è illustrato il modello idrogeologico di flusso elaborato per il dimensionamento dell'impianto.

Come già accennato, alla luce dei risultati dell'ultima campagna di monitoraggio della falda (gennaio 2026) che hanno mostrato assenza di contaminazione da Cromo VI, il progetto prevede innanzitutto la prosecuzione dei monitoraggi periodici della falda (come illustrato al paragrafo 6.5) al fine di verificare il proseguo del trend di contaminazione del parametro. **Il sistema di messa in sicurezza della falda, implementato come descritto in seguito, sarà predisposto ma mantenuto inattivo fino in caso di perdurare dello stato di non contaminazione, garantendo la rapida attivazione nel caso di riscontro di nuovi superamenti.**

## 5.1 Test idraulici effettuati

Al fine di adeguare il dimensionamento della barriera idraulica sono stati fatti test idraulici specifici in sito, i cui risultati sono presentati nel documento allegato, redatto da ambiente srl.

In particolare, è stata eseguita una prova a gradini di portata nel piezometro PZ10, che ha permesso di ricostruire la curva caratteristica del pozzo e valutare la conducibilità idraulica dell'acquifero, necessaria per il dimensionamento dei fronti di richiamo dei pozzi.

La prova ha previsto l'emungimento di acqua fino a una portata massima di 135 litri/minuti, facendo registrare un abbassamento massimo della falda di 0,62m. La ricostruzione della curva caratteristica del pozzo ha permesso di verificare che, con i valori di portata di emungimento a cui è stata impostata la prova, non si è raggiunta la portata critica del pozzo. Tale dato, unitamente ai ridotti valori di abbassamento registrati, indicano che l'acquifero ha una buona produttività / ricarica, coerentemente con le caratteristiche granulometriche dei terreni in esame.

L'interpretazione della prova di pompaggio ha permesso di stimare un valore di conducibilità idraulica medio pari a **2,1E-04 m/s**.

Si rimanda al report allegato per ulteriori dettagli.

## 5.2 Modello idrogeologico di flusso

Per il dimensionamento della barriera idraulica è stato elaborato un modello idrogeologico di flusso, utilizzando il codice di calcolo MODFLOW-6 tramite l'interfaccia grafica ModelMuse (USGS), operando in condizioni di regime stazionario (*steady-state*).



### *5.2.1 Impostazione del modello*

Per l'impostazione del modello sono stati considerati i seguenti parametri.

**Dominio e griglia:**

Il dominio di calcolo si estende per un'area di 600x600m, per minimizzare gli effetti di bordo. La griglia è stata discretizzata con celle di 10m di lato.

*Figura 4 – Dominio di simulazione*

**Assetto idrostratigrafico:**

Sono stati simulati due layer nell'ambito dell'acquifero in esame, per gestire la parziale penetrazione dei piezometri esistenti sull'area:

- Layer 1: 0-20m
- Layer 2: 20-50m

Il limite inferiore, corrispondente alla base dell'acquifero, costituisce un limite impermeabile.



**Parametrizzazione idraulica:**

A entrambi i layer sono stati attribuiti i seguenti parametri idraulici:

- Conducibilità idraulica (k): 2,1E-4 m/s (sulla base dei test idraulici sito-specifici);
- Porosità efficace: 0,25 (su base bibliografica in considerazione della tessitura dell'acquifero, costituito prevalentemente da sabbie e ghiaie).

**Condizioni al Contorno:**

ai bordi del domino sono state imposte condizioni al contorno tipo Constant Head Boundary (CHD), definite sulla base dell'assetto piezometrico rilevato in occasione dell'ultima campagna di monitoraggio ufficiale condotta sull'area (ottobre 2025). Le condizioni al contorno sono state impostate in maniera tale da ottenere, con la simulazione numerica, un risultato analogo a quello ricostruito sulla base dei dati di campo, in termini di geometria della superficie piezometrica (direzioni di flusso e gradiente idraulico).

Nella figura seguente si riporta la piezometria statica ricostruita sulla base dei dati di campo di ottobre 2025 utilizzata per la definizione delle condizioni al contorno CHD.

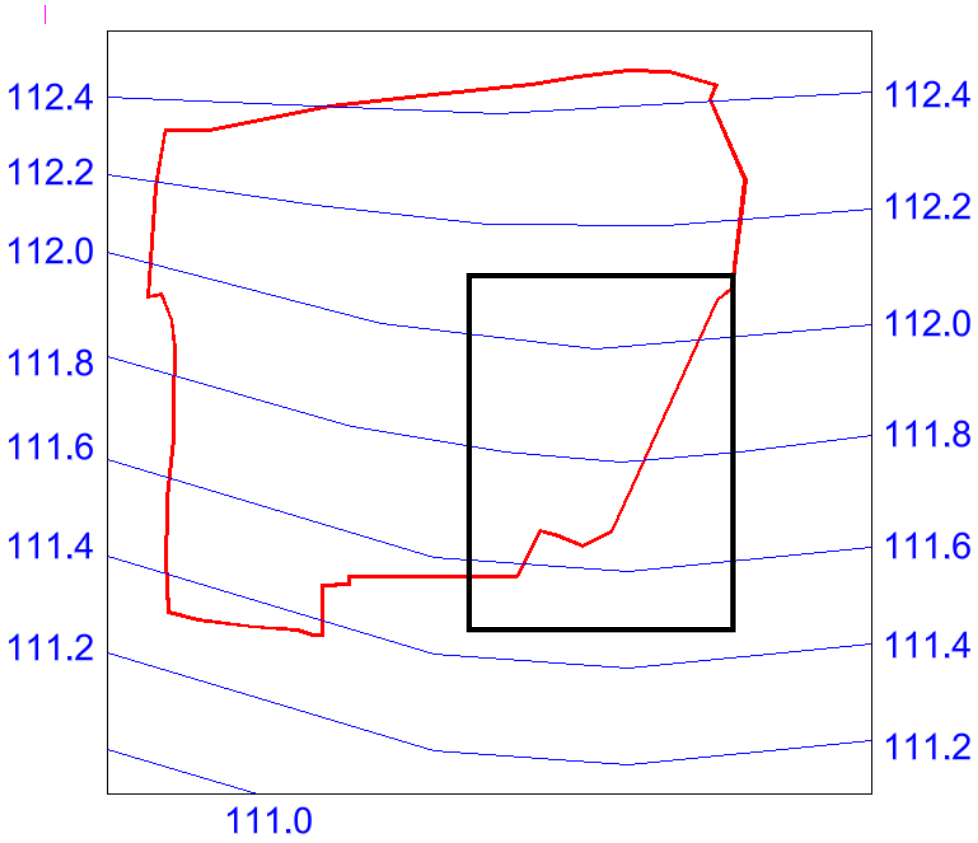



*Figura 5 – Condizioni al contorno - piezometria statica ottobre 2025 (in nero l'area di interesse)*

### *5.2.2 Risultati del modello in modalità statica*

Nella figura seguente si riportano i risultati della simulazione eseguita in modalità statica (in assenza di emungimenti). Come si può osservare, il modello riproduce fedelmente l'andamento piezometrico misurato in corrispondenza dell'area di interesse, sia in termine di direzione di flusso (prevalentemente nord-sud) sia di gradiente idraulico (circa 2,5 per mille).

I quadrati neri indicano l'ubicazione dei piezometri di monitoraggio, utilizzati come punti di calibrazione del modello.

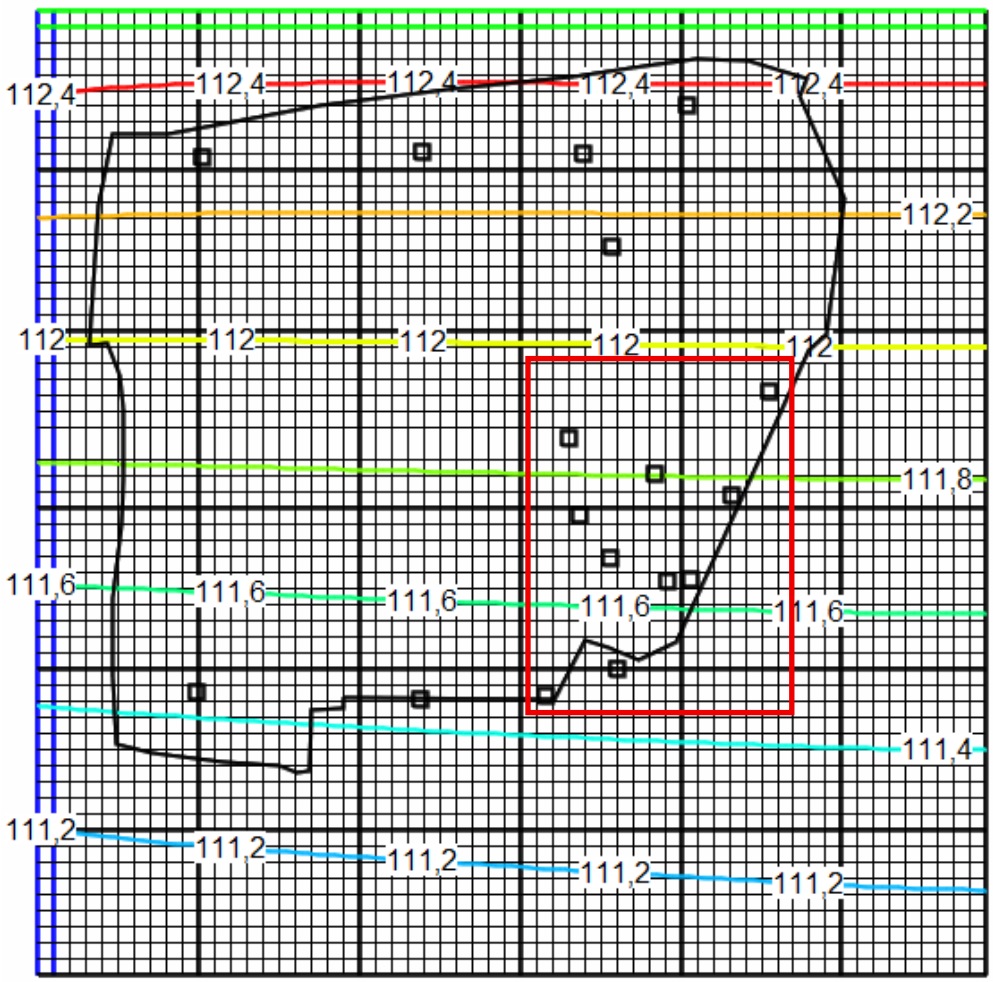



*Figura 6 – Risultati del modello – modalità statica (in rosso l'area di interesse)*

La calibrazione è stata verificata confrontando i livelli calcolati con i dati dei piezometri di sito della campagna di monitoraggio considerata per l'impostazione del modello (ottobre 2025). Di seguito si riportano i dati di calibrazione con evidenza degli scarti misurati in ciascun piezometro. Si segnala che dei calcoli sono stati esclusi i dati relativi ai piezometri PZMONTE e PZVALLE, che presentavano delle evidenti anomalie nella campagna in esame come evidente dalla ricostruzione piezometrica effettuata (cfr. report esiti monitoraggio ottobre 2025, in allegato).

I risultati mostrano scarti generalmente dell'ordine di pochi centimetri e un coefficiente $R^2$ della curva di calibrazione prossimo a 1, indice di un'elevata affidabilità del modello.

| Punto | Quota piezometrica misurata ottobre 2025 (m slm) | Quota piezometrica simulata (m slm) | Scarto (m) |
|---|---|---|---|
| PZ2 | 112,41 | 112,38 | -0,03 |
| PZ3 | 112,25 | 112,28 | 0,03 |
| PZ4 | 111,45 | 111,43 | -0,02 |
| PZ5 | 111,44 | 111,44 | 0,00 |

| Punto | Quota piezometrica misurata ottobre 2025 (m slm) | Quota piezometrica simulata (m slm) | Scarto (m) |
|---|---|---|---|
| PZ6 | 112,16 | 112,30 | 0,15 |
| PZ7 | 112,02 | 111,95 | -0,07 |
| PZ9 | 111,75 | 111,72 | -0,03 |
| PZ10 | 111,74 | 111,65 | -0,08 |
| PZ11 | 111,71 | 111,65 | -0,06 |
| PZ12 | 111,80 | 111,67 | -0,13 |
| PZ13 | 111,63 | 111,50 | -0,13 |
| PZ14 | 112,19 | 112,14 | -0,05 |
| PZ16 | 111,93 | 111,84 | -0,09 |
| PZ17 | 111,80 | 111,82 | 0,02 |
| PZ18 | 111,75 | 111,80 | 0,05 |

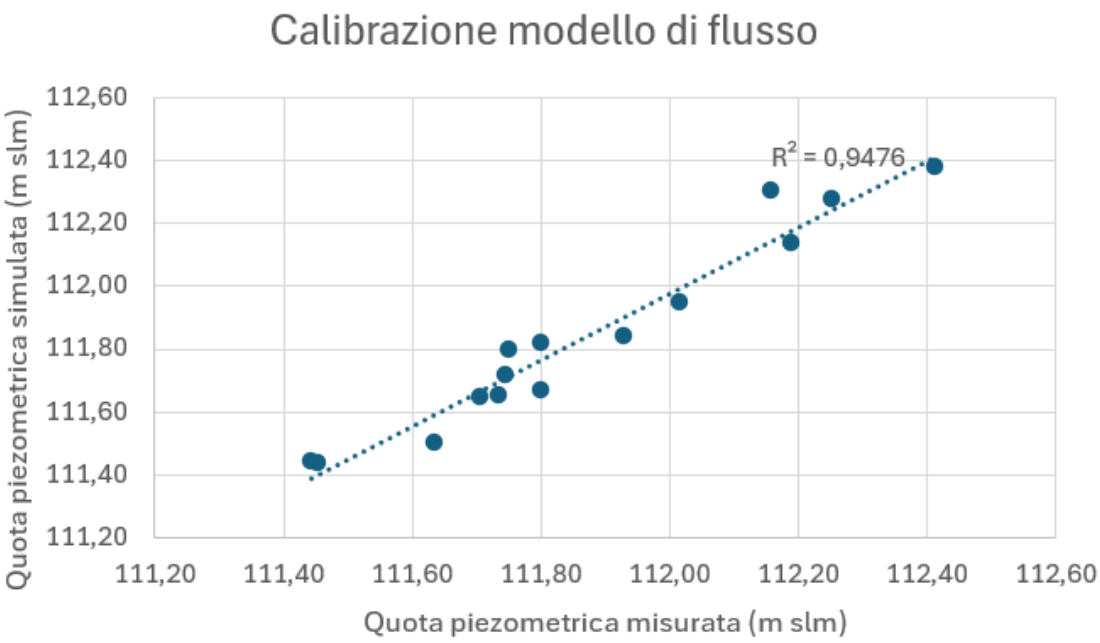



*Figura 7 – Calibrazione del modello*

### *5.2.3 Inserimento pozzi barriera e simulazione di progetto*

A seguito della calibrazione del modello in modalità statica si è proceduto all'inserimento nel dominio dei pozzi di emungimento, al fine di dimensionare correttamente la barriera idraulica per garantire una sufficiente estensione del fronte di richiamo, tale da captare l'intero fronte idraulico proveniente dalle aree in cui è stata riscontrata la presenza di contaminazione da cromo VI.

La valutazione dei fronti di richiamo è stata effettuata mediante *particle tracking*, utilizzando il codice di calcolo MODPATH. Sono state inserite particelle virtuali in corrispondenza del limite di monte del dominio, per valutarne il modo advettivo nel campo di moto simulato. Le particelle sono state inserite in corrispondenza del bottom del layer 1 (profondità 20m, corrispondente alla massima profondità a cui è stata riscontrata la contaminazione, pari alla profondità dei piezometri), nel numero di 2 per ciascuna cella (quindi con passo 5m).

Per l'inserimento dei pozzi si è proceduto in modalità "*try and error*" inserendoli nel modello in maniera iterativa e adattandone l'ubicazione e la portata in base alle necessità. Adottando una **portata di emungimento di ciascun pozzo pari a 1 litro/secondo**, pari all'attuale sistema di MISE installato in PZ1, la barriera idraulica risulta costituita da **n.4 pozzi profondi 20m**, ubicati come da figura seguente. Con tale configurazione, è garantito un fronte di richiamo di ampiezza pari a circa 200m, idoneo per captare con sufficiente margine di sicurezza il fronte idraulico contaminato proveniente da monte.



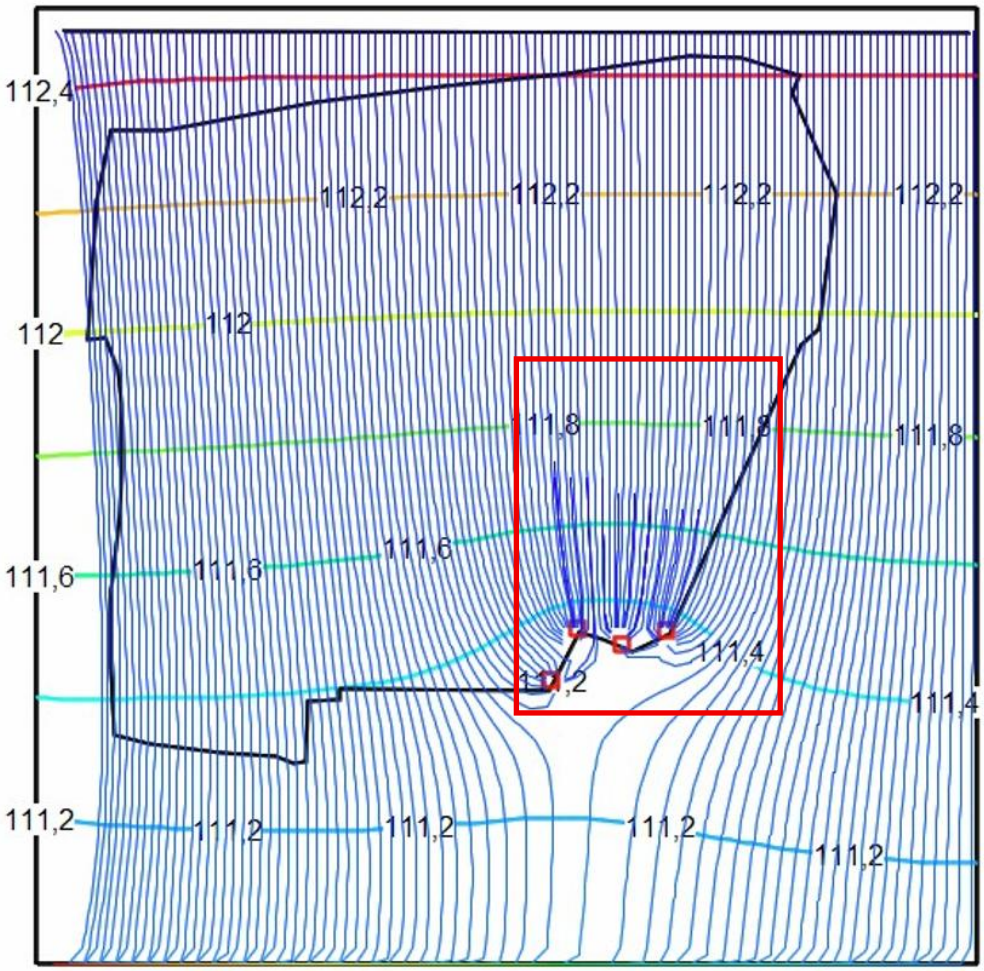



*Figura 8 – Risultati del modello – modalità dinamica (in rosso l'area di interesse)*

## 5.3 Implementazione dell'impianto di pump & treat

Di seguito si riportano le specifiche necessarie per l'implementazione dei pozzi barriera e dell'impianto TAF.

### *5.3.1 Pozzi barriera*

I pozzi barriera saranno realizzati con le seguenti caratteristiche:

- Perforazione a carotaggio continuo fino alla profondità di 20m, con analisi dettagliata della stratigrafia;
- Installazione di tubazione in PVC atossico diametro di diametro minimo 4'', fessurata nell'intervallo 10-20m;
- Completamento del foro con ghiaietto siliceo calibrato in corrispondenza dei tratti fessurati e bentonite in corrispondenza dei tratti ciechi. Cementazione sommitale del foro con boiacca cementizia;
- Pompa elettrosommersa con sondini di livello per la protezione da marcia a secco. La pompa dovrà essere dimensionata per garantire l'emungimento della portata di progetto con sufficiente margine di sicurezza, anche in funzione delle perdite di carico da valutarsi in base al progetto costruttivo dell'impianto;
- Testa pozzo dotata delle seguenti apparecchiature elettromeccaniche: valvola di non ritorno, rubinetto per campionamento, saracinesca, misuratore di portata, contatore Woltmann. La testa pozzo potrà essere interrata o fuori terra a seconda delle esigenze logistiche dei luoghi.

L'ubicazione indicativa dei pozzi barriera è riportata in Tavola 1. Resta inteso che il posizionamento definitivo degli stessi sarà definito in fase costruttiva in considerazione della logistica dei luoghi e delle interferenze con il cantiere edile; gli stessi potranno essere rilocalizzati nell'ambito delle aree individuate garantendo il completo sbarramento del fronte idraulico proveniente da monte, da verificare tramite il modello idrogeologico di flusso.

Al termine dell'installazione di ciascun pozzo si procederà all'esecuzione di:

- Una prova di portata a gradini, per la definizione della curva caratteristica del pozzo e la stima dell'efficienza;
- Una prova a lunga durata a portata costante per la determinazione dei parametri idraulici dell'acquifero.

Nel caso in cui le prove evidenziassero discostamenti significativi dei valori di conducibilità idraulica dell'acquifero rispetto a quanto registrato nei test preliminari, si procederà alla ritaratura del modello idrogeologico di flusso e, di conseguenza, a un affinamento in corso d'opera del dimensionamento della barriera idraulica. In tale evenienza, potranno essere rivalutati in corso d'opera i principali caratteri dimensionali della barriera (numero di pozzi di emungimento, portata e relativa ubicazione), garantendo l'efficacia dello sbarramento da verificare tramite il modello idrogeologico di flusso.

### *5.3.2 Rete di mandata delle acque*

Le acque provenienti dai pozzi saranno convogliate in un collettore opportunamente dimensionato per il transito della portata di progetto, che recapiterà direttamente alla vasca di testa dell'impianto TAF.

La tubazione potrà essere interrata o fuori terra in funzione delle esigenze logistiche che saranno definite in fase operativa; in ogni caso, la stessa dovrà essere opportunamente coibentata per protezione dal gelo.



### *5.3.3 Impianto TAF*

Si procederà alla sostituzione dell'impianto TAF attualmente installato presso il sito per il trattamento delle acque provenienti da PZ1, con un impianto di nuova realizzazione di capienza sufficiente a trattare la nuova portata di progetto (14,4 mc/h) e opportunamente adeguato per il trattamento delle acque di ricircolo derivanti dalle attività di bonifica della falda illustrate al capitolo successivo. L'impianto di trattamento sarà dimensionato con un adeguato fattore di sicurezza (FS=1,2) per garantire il trattamento di una portata superiore a quella di progetto, in caso di necessità di gestione di picchi di portata imprevisti, e per garantire un'eventuale modulazione della portata dei singoli pozzi in caso di necessità.

Lo schema di processo del nuovo impianto TAF prevedrà i seguenti moduli in sequenza. Sono previste due linee di filtrazione in parallelo, al fine di garantire la continuità di trattamento h24 anche in caso di fermo di una linea a causa di guasto o manutenzione:

- Vasca di accumulo/ossidazione dove recapitano le acque provenienti dai pozzi e dove avviene la pre-ossidazione delle acque (mediante gorgogliamento o dosaggio di ipoclorito) funzionale alla precipitazione di ferro e manganese;
- Filtrazione a sabbia e pirolusite (n.2 moduli in parallelo) per la rimozione dei solidi sospesi, ferro e manganese precipitati;
- Filtrazione a carboni attivi (n.2 moduli in parallelo) per la rimozione di eventuale TOC residuo (siero di latte proveniente dal sistema di ricircolo);
- Filtro a resine a scambio ionico (n.2 moduli in parallelo) per la rimozione specifica di Cromo VI residuo.

Le acque così trattate saranno inviate alla linea di scarico, lungo la quale sarà installato un sistema di ripartizione in linea per separare le acque destinate al sistema di ricircolo (vedi dettagli nel Progetto di Bonifica, capitolo 6), da quelle inviate allo scarico in CIS (Roggia Firone) in corrispondenza del punto di scarico autorizzato.

**Alla luce della portata di scarico in CIS prevista da progetto, superiore a quella attualmente autorizzata (1 litro/secondo), nell'ambito dell'autorizzazione all'esecuzione del presente Progetto di bonifica è da ricomprendersi anche l'adeguamento all'autorizzazione allo scarico attualmente in essere.**

L'impianto sarà dotato di valvole manuali (stacchi) e prese di campionamento tra ciascun modulo e il successivo, al fine di consentire il bypass temporaneo dei filtri in caso di manutenzione garantendo la continuità operativa del trattamento. I punti di campionamento consentiranno di effettuare le opportune verifiche sull'efficienza di abbattimento di ciascun modulo di filtrazione.

L'impianto sarà controllato mediante PLC per la verifica di tutti i parametri di processo (portate pozzi, portate e pressioni in ingresso/uscita da ciascun modulo di filtrazione, portata dello scarico) e per la visualizzazione degli allarmi.

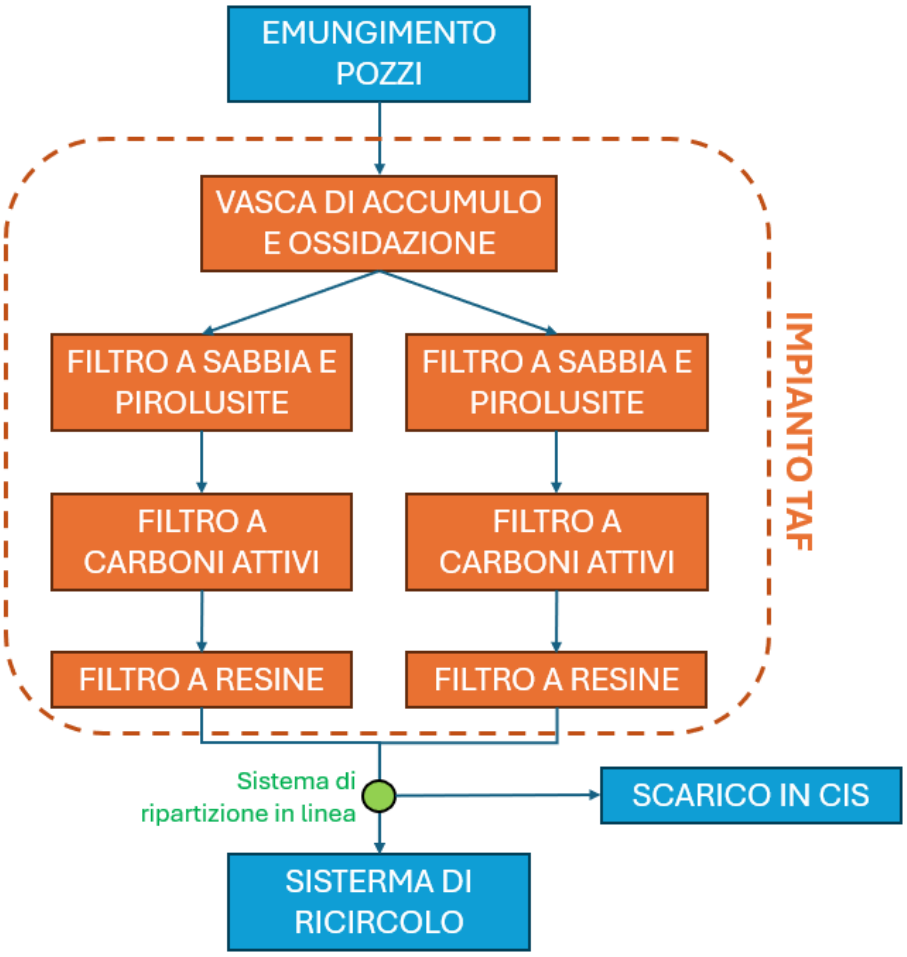



*Figura 9 – Shema funzionale impianto TAF*

# 6 PROGETTO OPERATIVO DI BONIFICA ACQUE DI FALDA

Nel seguente capitolo è illustrato il Progetto Operativo di Bonifica della falda del sito in esame.

Come già indicato per l'adeguamento del sistema di messa in sicurezza, alla luce dei risultati dell'ultima campagna di monitoraggio della falda (gennaio 2026) che hanno mostrato assenza di contaminazione da Cromo VI, **il sistema di bonifica di seguito illustrato sarà predisposto ma mantenuto inattivo fino in caso di perdurare dello stato di non contaminazione della falda, garantendo la rapida attivazione nel caso di riscontro di nuovi superamenti**.



## 6.1 Obiettivi di bonifica

Il presente Progetto Operativo di Bonifica (POB) si pone l'obiettivo di ricondurre le concentrazioni di Cromo VI nelle acque sotterranee al di sotto dei limiti normativi vigenti, eliminando il rischio ambientale associato alla migrazione della contaminazione verso valle.

La conformità agli obiettivi di bonifica dovrà essere verificata presso il Punto di Conformità (POC), identificato lungo il confine di valle idrogeologico del sito, presidiato dalla barriera idraulica e dai piezometri della rete di monitoraggio (PZ1, PZ VALLE).

## 6.2 Criteri di scelta della tecnologia di bonifica

### *6.2.1 Analisi comparativa e scelta della tecnologia di bonifica*

Per l'individuazione della migliore strategia d'intervento nel sito in esame, sono state vagliate le principali tecnologie di bonifica delle acque sotterranee applicabili alla contaminazione da Cromo VI, tenendo conto delle caratteristiche idrogeologiche del sito, del tenore della contaminazione e dell'estensione dell'area contaminata.

| **Permeable Reactive Barriers (PRB) – Barriere Reattive Permeabili** | |
|---|---|
| **Descrizione** | Trincee drenanti riempite di materiale reattivo (es. Ferro Zero Valente - ZVI). |
| **Vantaggi** | Tecnologia passiva, non richiede energia. |
| **Svantaggi** | Costi di installazione molto elevati in considerazione dell'estensione dell'area contaminata. Rischio di intasamento (clogging) nel tempo. |
| **Valutazione** | Scartata per insostenibilità economica e difficoltà realizzative alla profondità di soggiacenza della falda. |

| **Iniezione di Riducenti Chimici (ISCR)** | |
|---|---|
| **Descrizione** | Iniezione puntiforme di reagenti chimici (es. metabisolfito di sodio, sali ferrosi). |
| **Vantaggi** | Reazione quasi istantanea. L'elevata velocità di reazione dei reagenti chimici può costituire però anche uno svantaggio, in quanto comporterebbe un consumo immediato degli stessi in prossimità dei punti di immissione, limitando la distribuzione omogenea su un'area vasta. |
| **Svantaggi** | Costo elevato dei reagenti, raggio d'influenza limitato, necessità di numerose re-immissioni per contrastare il rebound. |

| | |
|---|---|
| **Valutazione** | Scartata a favore di soluzioni con maggiore persistenza temporale. |

| **Bioremediation Riduttiva In Situ (ISBR) tramite siero di latte** | |
|---|---|
| **Descrizione** | Immissione di un substrato organico (siero di latte) per stimolare la riduzione biologica naturale. |
| **Vantaggi** | - Persistenza: il substrato organico permane nell'acquifero garantendo una protezione continua contro il desorbimento residuale.<br>- Sostenibilità: utilizzo di un sottoprodotto dell'industria agroalimentare (Economia Circolare), reperibile a basso costo.<br>- Efficacia idrodinamica: la solubilità del siero ne permette una distribuzione omogenea sfruttando l'alta permeabilità dell'acquifero, eventualmente anche sfruttando un sistema di reiniezione in falda delle acque estratte mediante sistema di messa in sicurezza della falda.<br>- Tecnologia riconosciuta e validata a livello nazionale e internazionale. |
| **Svantaggi** | Nessuno. |
| **Valutazione** | Tecnologia scelta in quanto ritenuta la più idonea per coniugare efficacia tecnica, sostenibilità ambientale e costi di gestione. |



Alla luce di quanto sopra, la tecnologia di bonifica scelta è costituita dalla **Bioremediation Riduttiva In Situ (ISBR) tramite iniezioni di siero di latte**. L'efficacia della tecnologia sarà ulteriormente stimolata dal **ricircolo delle acque emunte** dall'intervento di MISE, che saranno opportunamente miscelate con il siero di latte dopo il trattamento in impianto mobile, così da stimolare una maggiore propagazione in falda del substrato ammendante e garantire al contempo una "cella di trattamento" chiusa in grado di trattenere la fuoriuscita all'esterno del sito di eventuali sottoprodotti di reazione. Il progetto, in sintesi, prevedrà:

- Iniezioni di siero di latte a monte idrogeologico dell'area contaminata, mediante una linea di pozzi di re-immissione in cui vengono ricircolate le acque emunte dal sistema di messa in sicurezza della falda, opportunamente miscelate con il siero di latte;
- Emungimento a valle mediante la barriera idraulica per l'estrazione dell'acqua contaminata e il trattamento in impianto mobile (sistema P&T) prima della miscelazione e ricircolo a monte.

### *6.2.2 Principi biochimici della riduzione del Cromo VI*

La tecnologia proposta si basa sul processo di **Bioriduzione In Situ (ISBR - In Situ Bioreduction)**, che sfrutta il metabolismo di microrganismi autoctoni (batteri ferro-riduttori, solfato-riduttori e altri batteri eterotrofi) per indurre la trasformazione chimica del Cromo dalla forma esavalente (Cr(VI)) alla forma trivalente (Cr(III)).

**Meccanismo d'azione del siero di latte:**

Il siero di latte agisce come un potente donatore di elettroni (substrato organico) composto principalmente da lattosio, proteine e sali minerali. Il processo avviene attraverso due vie sinergiche:

- Riduzione indiretta (biostimolazione): l'immissione del substrato organico accelera il metabolismo dei batteri aerobi, che consumano rapidamente l'ossigeno disciolto e i nitrati presenti in falda. Questo determina un drastico abbassamento del potenziale di ossido-riduzione, portando l'acquifero in condizioni fortemente riducenti. In questo ambiente, specie chimiche come il Ferro e lo Zolfo diventano reagenti attivi capaci di ridurre chimicamente il Cromo VI.
- Riduzione diretta (enzimatica): alcune specie batteriche sono in grado di utilizzare direttamente il Cromo VI come accettore finale di elettroni nella loro catena respiratoria, riducendolo enzimaticamente a Cromo III come sottoprodotto metabolico.



**Stabilità a lungo termine:**

Il passaggio fondamentale per il raggiungimento degli obiettivi di bonifica risiede nella diversa natura chimica delle due specie:

- Cromo VI: estremamente solubile in acqua, tossico e altamente mobile nell'ambiente.
- Cromo III: presenta una solubilità estremamente bassa in un ampio range di pH (tra 5.5 e 12). Una volta ridotto, esso precipita istantaneamente sotto forma di idrossido di cromo o minerali misti di ferro-cromo, legandosi stabilmente alla matrice solida del terreno.

L'idrossido di Cromo III prodotto è una specie chimica termodinamicamente stabile nelle normali condizioni idrogeologiche del sito. Il processo di riduzione è considerato irreversibile nel lungo periodo, poiché l'energia necessaria per ri-ossidare il Cromo III a Cromo VI è estremamente elevata e non si riscontra naturalmente in assenza di ossidanti fortissimi (come i minerali di manganese rari in contesti alluvionali tipici).

**Produzione di sottoprodotti secondari:**

L'attivazione dei processi biologici riduttivi comporta alcune modifiche temporanee del chimismo della falda, che devono essere gestite come indicatori di efficacia del trattamento piuttosto che come criticità ambientali:

- Mobilitazione di ferro e manganese**:** l'abbassamento del potenziale Redox porta inevitabilmente alla solubilizzazione del ferro e del manganese naturalmente presenti nei terreni. Questo fenomeno è il segnale che l'ambiente è diventato idoneo alla riduzione del Cromo VI. Tali metalli riprecipiteranno naturalmente una volta esaurito il substrato organico e ripristinate le condizioni basali di ossigenazione.
- Variazioni di pH e acidi organici**:** la fermentazione del lattosio produce acidi grassi volatili (come acido lattico e acetico) che possono abbassare localmente il pH. La naturale presenza di frazione carbonatica nell'acquifero (ghiaie e sabbie) garantisce generalmente un ottimo potere tampone, mantenendo il pH entro range sicuri per la stabilità dei precipitati.

Si evidenzia, infine, che l'intervento di ISBR mediante iniezione di siero di latte è funzionale non solo alla riduzione del Cromo VI, ma favorisce anche la **stabilizzazione del Molibdeno**, riscontrato saltuariamente

nelle acque di falda dell'area oggetto di intervento di bonifica, seppur in concentrazioni inferiori ai limiti di riferimento (cfr. paragrafo 3.2.2). La creazione di condizioni fortemente riducenti promuoverà la formazione di fasi minerali (quali solfuri di ferro), responsabili del sequestro del Molibdeno dalla fase disciolta tramite meccanismi di adsorbimento e co-precipitazione, garantendo l'abbattimento delle concentrazioni anche per tale analita.



### *6.2.3 Casi studio di successo e riferimenti normativi*

L'efficacia della bioriduzione del Cromo VI tramite iniezione di siero di latte (o substrati carboniosi analoghi) è ampiamente documentata sia a livello nazionale che internazionale. Di seguito si riportano i riferimenti tecnici e normativi più significativi, scelti per la loro analogia idrogeologica e procedurale con il sito in esame:

<u>SIN Brescia-Caffaro: Sito Baratti Eredi Inselvini S.r.l. (Italia):</u>

Rappresenta il principale riferimento normativo in Italia per l'autorizzazione del siero di latte in contesti complessi. L'intervento è stato validato dal Ministero dell'Ambiente (oggi MASE) con Decreto n. 4974 del 10/04/2014, previo parere favorevole di ISPRA (Parere IS/SUO 2013/099). Il progetto prevedeva l'uso del siero di latte per il trattamento di Cromo VI e Cromo totale nelle acque sotterranee, con monitoraggi biologici costanti per certificare la stabilità della riduzione.

<u>Area Industriale di Narni – Progetto Territoriale (Umbria):</u>

L'area industriale di Narni rappresenta uno dei primi casi in Italia di applicazione del siero di latte su scala reale per il trattamento di contaminazioni miste da Cromo VI e solventi clorurati. I risultati positivi ottenuti, che hanno permesso la riattivazione di aree industriali dismesse, hanno portato nel 2025 alla sottoscrizione di un accordo tra Regione Umbria e ARPA Umbria per la messa a sistema di questa tecnologia a livello regionale, confermandone l'affidabilità e la maturità tecnica ("Progetto SIERO").

<u>Sito ex Way Assauto, Asti (Piemonte):</u>

Il progetto (avviato nel 2014) ha previsto il passaggio dal solo Pump & Treat alla bioriduzione in situ per abbattere il Cromo VI in un acquifero ghiaioso altamente permeabile. Sotto la supervisione di ARPA Piemonte, l'iniezione di substrati organici ha dimostrato di poter gestire la sorgente secondaria e i fenomeni di rebound.

L'analisi dei precedenti sopra riportati permette di trarre le seguenti conclusioni a supporto della proposta attuale:

- L'uso del siero di latte risponde ai criteri di sostenibilità e "green remediation" promossi dalle linee guida ISPRA;

- I casi studio dimostrano che la tecnologia è in grado di abbattere le concentrazioni di Cromo VI fino a valori inferiori alle CSC (5 µg/l), anche partendo da livelli di contaminazione molto elevati.
- La chiusura amministrativa dei procedimenti certifica che la trasformazione chimica in Cromo III è duratura e sicura per la salute pubblica.

### *6.2.4 Compatibilità della tecnologia con l'assetto idrogeologico del sito*



L'applicazione della bioriduzione in situ tramite sistema a ricircolo risulta particolarmente efficace nel sito in esame grazie alla perfetta sinergia tra la cinetica del siero di latte e i parametri idrodinamici rilevati.

La conducibilità idraulica dell'acquifero, stimata in circa 2,1E-4 m/s, permette una distribuzione omogenea del reagente su tutta l'area contaminata mediante i pozzi di iniezione, evitando le sovrappressioni tipiche dei terreni poco permeabili. La velocità di filtrazione (circa 20 cm/giorno) assicura un tempo di residenza del substrato organico sufficiente affinché la biomassa microbica possa completare le reazioni di riduzione del Cromo VI prima che l'acqua raggiunga i punti di estrazione.

La natura fluida del siero permette lo sviluppo di un biofilm attivo anche nelle zone di interfaccia (frangia capillare), garantendo l'efficacia della bonifica anche in tale orizzonte, prevenendo futuri rilasci di contaminante.

## 6.3 Test operativo di ottimizzazione

Prima dell'attivazione del sistema di iniezione e ricircolo full-scale, è prevista l'esecuzione di un test operativo di durata limitata su una porzione rappresentativa del sito, al fine di affinare i parametri dimensionali dell'intervento (raggio di influenza, volume di acqua oggetto di ricircolo, dosaggio del siero di latte).

Nei paragrafi seguenti si riportano le indicazioni operative di massima per l'esecuzione del test, che sarà definito nei dettagli in fase operativa.

### *6.3.1 Obiettivi della fase di taratura*

Il test pilota mira a determinare i seguenti parametri sito-specifici:

- Raggio d'influenza (ROI): verificare l'estensione della diffusione laterale del siero di latte rispetto ai punti di iniezione;
- Volume di ricircolo: determinare il rapporto ideale tra portata emunta dalla barriera idraulica e portata re-iniettata. L'obiettivo è individuare la portata minima necessaria a garantire la distribuzione del reagente su tutta la sezione d'interesse, mantenendo al contempo un gradiente idraulico verso i pozzi di estrazione che assicuri il totale confinamento del siero;
- Cinetica di abbattimento: stimare il tempo necessario per osservare la riduzione significativa del Cromo VI;

- Consumo del substrato: misurare la rapidità con cui la biomassa consuma il carbonio organico per ottimizzare il dosaggio del siero di latte (concentrazione del siero nelle acque di ricircolo) e la frequenza dei cicli di iniezione;
- Produzione sottoprodotti: monitorare l'entità della mobilitazione transitoria di ferro e manganese.

### *6.3.2 Modalità di svolgimento del test pilota*



Il test sarà condotto in prossimità di un piezometro con maggiore concentrazione di Cromo VI, da definirsi in fase operativa anche in base alla logistica dell'intervento, che costituirà il punto di immissione del siero di latte per il test.

Si procederà alla realizzazione di un campo prova mediante la realizzazione di piezometri di monitoraggio in prossimità del punto scelto, ubicati a distanze crescenti (es. 2, 5, 10m) e direzioni differenti. In particolare, al fine di discriminare l'espansione radiale indotta dalla pressione di iniezione dal trasporto advettivo naturale, la rete di monitoraggio del test pilota comprenderà punti di controllo disposti sia longitudinalmente (lungo la linea di flusso) che trasversalmente al gradiente idraulico. Tale configurazione permetterà di definire un ROI laterale cautelativo, parametro indispensabile per il corretto dimensionamento dell'interasse tra i pozzi nella fase full-scale e per garantire la completa sovrapposizione dei fronti riducenti.

Una volta predisposto il campo prova, si procederà all'iniezione in pressione di una portata nota di acqua opportunamente miscelata al siero di latte. Il grado di diluizione sarà definito in fase operativa in base alla risposta del sistema (pressione di iniezione e risalita piezometrica), partendo dal dosaggio teorico calcolato in sede di progetto (0,5%).

### *6.3.3 Protocollo di monitoraggio*

Durante il test (durata stimata: 30-60 giorni), verranno eseguite campagne di campionamento a frequenza ravvicinata (settimanale) sui punti di monitoraggio scelti, analizzando almeno i seguenti parametri:

- Parametri di campo: pH, potenziale redox, ossigeno disciolto, conducibilità elettrica.
- Indicatori di processo: Cromo VI, Cromo totale, Ferro, Manganese, Carbonio Organico Totale (TOC).
- Metaboliti intermedi: Acidi grassi volatili (es. lattato, acetato) per confermare l'attività fermentativa.

Inoltre, i punti di monitoraggio saranno allestiti con sondini per la misura in continuo dei parametri di campo di interesse (livello di falda, pH, potenziale redox, ossigeno disciolto, conducibilità elettrica).

### *6.3.4 Taratura del sistema full-scale*

I dati raccolti saranno elaborati per la definizione dei parametri caratteristici dell'intervento e per la taratura definitiva del sistema di bonifica del sito. La taratura del sistema full-scale sarà illustrata in un documento trasmesso agli Enti prima dell'avvio della bonifica; in particolare, saranno definiti nel dettaglio:

- Raggi di influenza;
- Numero e ubicazione dei pozzi di iniezione e relativa interdistanza;

- Portate e pressioni ottimali di ricircolo;
- Dosaggio del siero di latte;
- Caratteristiche costruttive e dimensionali dell'impianto.

Nel medesimo documento saranno illustrate le prove di pompaggio eseguite nell'ambito dell'implementazione della barriera idraulica, e l'eventuale ricalibrazione del modello di flusso per la verifica dell'efficacia dello sbarramento.

**Sulla base dei parametri così determinati, il dimensionamento preliminare del sistema di bonifica descritto nel presente documento potrà essere oggetto di variazioni e ottimizzazioni, senza che ciò debba costituire variante al progetto approvato.**



## 6.4 Dimensionamento e specifiche tecniche degli interventi

Il progetto di bonifica prevede un pre-dimensionamento dei sistemi di iniezione, per una definizione preliminare dei principali parametri dimensionali dell'intervento (es. numero di punti di iniezione, tipologia e quantitativi di prodotto iniettato, frequenza delle iniezioni). L'esecuzione di test operativi di ottimizzazione, da realizzarsi nelle fasi preliminari dell'intervento come illustrati al paragrafo 6.3, consentirà un'eventuale ritaratura ottimale del sistema.

In ogni caso, il progetto prevede una necessaria **flessibilità al fine di consentire l'eventuale rimodulazione dei parametri dimensionali dell'intervento di cui sopra nel corso delle attività di bonifica , senza che ciò costituisca variante del Progetto Operativo di Bonifica approvato, in funzione dei risultati dei monitoraggi che saranno svolti contestualmente alle attività**.

### *6.4.1 Schema funzionale del sistema a ricircolo e layout preliminare*

Lo schema funzionale si articola nelle seguenti fasi:

1. Barriera idraulica e TAF: le acque sotterranee vengono emunte dai pozzi della barriera idraulica, situati a valle idrogeologica del sito, e trattate in un impianto mobile (TAF) per l'abbattimento del Cromo VI (cfr capitolo 5). Questa fase garantisce il confinamento idraulico costante, impedendo la migrazione del Cromo VI o di eventuali sottoprodotti del trattamento verso l'esterno. le acque trattate vengono convogliate verso un collettore comune. Tramite un sistema di ripartizione in linea, una porzione della portata estratta viene inviata al sistema di miscelazione; la rimanente porzione di acqua emunta è inviata allo scarico in CIS.
2. Miscelazione: le acque provenienti dal TAF transitano attraverso un sistema di dosaggio in linea, dove, mediante pompe dosatrici, il siero di latte viene miscelato all'acqua di falda in concentrazioni prestabilite.
3. Re-immissione: l'acqua additivata con il substrato organico, a seguito di opportuna miscelazione in linea, viene inviata ai punti di iniezione situati a monte del pennacchio. L'iniezione crea un lieve rialzo piezometrico locale che, combinato con la depressione indotta dai pozzi di estrazione, accelera il passaggio del siero attraverso la matrice contaminata.

Di seguito si riporta lo schema funzionale dell'impianto, le cui componenti sono illustrate nei paragrafi seguenti.

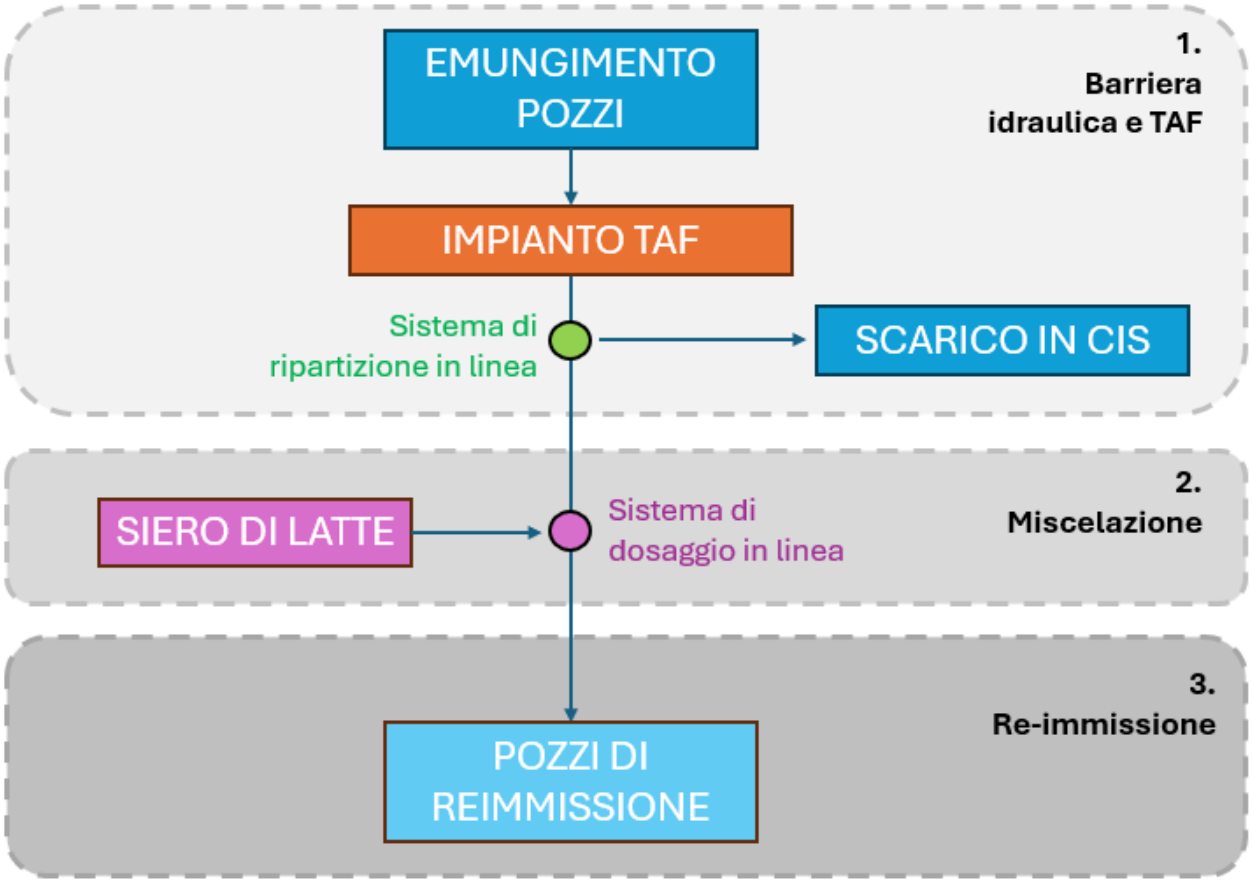



*Figura 10 – Schema funzionale sistema a ricircolo*

### *6.4.2 Calcolo del volume d'acqua e portate di progetto*

Di seguito si dettagliano i calcoli effettuati per individuare il volume d'acqua oggetto di trattamento e le portate di progetto.

- Area oggetto di trattamento: cautelativamente si considera una superficie di 10.000mq;
- Spessore saturo di acquifero: si considera uno spessore di 10m, corrispondente allo spessore di acquifero oggetto di monitoraggio (i piezometri sono profondi 20m);
- Porosità efficace: si considera un valore di 0.25, ritenuto cautelativo per ghiaie e sabbie;
- Volume di acqua da trattare: 10.000mq * 10m * 0.25 = **25.000mc**

Considerando una portata di emungimento della barriera idraulica pari a 4 litri/secondo (cfr. capitolo 5) e impostando un valore di **ricircolo pari al 70%** (al fine di garantire con sicurezza un confinamento idraulico totale), risulta una portata di iniezione pari a circa **10 mc/h**.

Sulla base di quanto sopra, il tempo totale di ricircolo è di circa **104 giorni**.

Il sistema di ricircolo sarà progettato per operare con una portata variabile tra il 40% e il 70% della portata emunta dalla barriera idraulica. La fase di avviamento (primi 3-4 mesi) prevederà il regime massimo per garantire la saturazione del volume dei pori e l'abbattimento rapido dell'ossigeno. Successivamente, sulla base dei monitoraggi del test pilota, la portata potrà essere modulata verso il limite inferiore per ottimizzare il consumo di reagente e la gestione logistica dei rifornimenti, mantenendo comunque un tempo di ricircolo idoneo al raggiungimento degli obiettivi di bonifica.



Si evidenzia che la barriera idraulica, implementata come da capitolo 5, risulta adeguata in termini di numero di pozzi e portata di emungimento a intercettare anche le acque reiniettate dai pozzi della bonifica, garantendo pertanto la completa chiusura del sistema. Nelle figure seguenti si riporta un estratto del modello di flusso implementato col *particle tracking* per effettuare tale verifica.

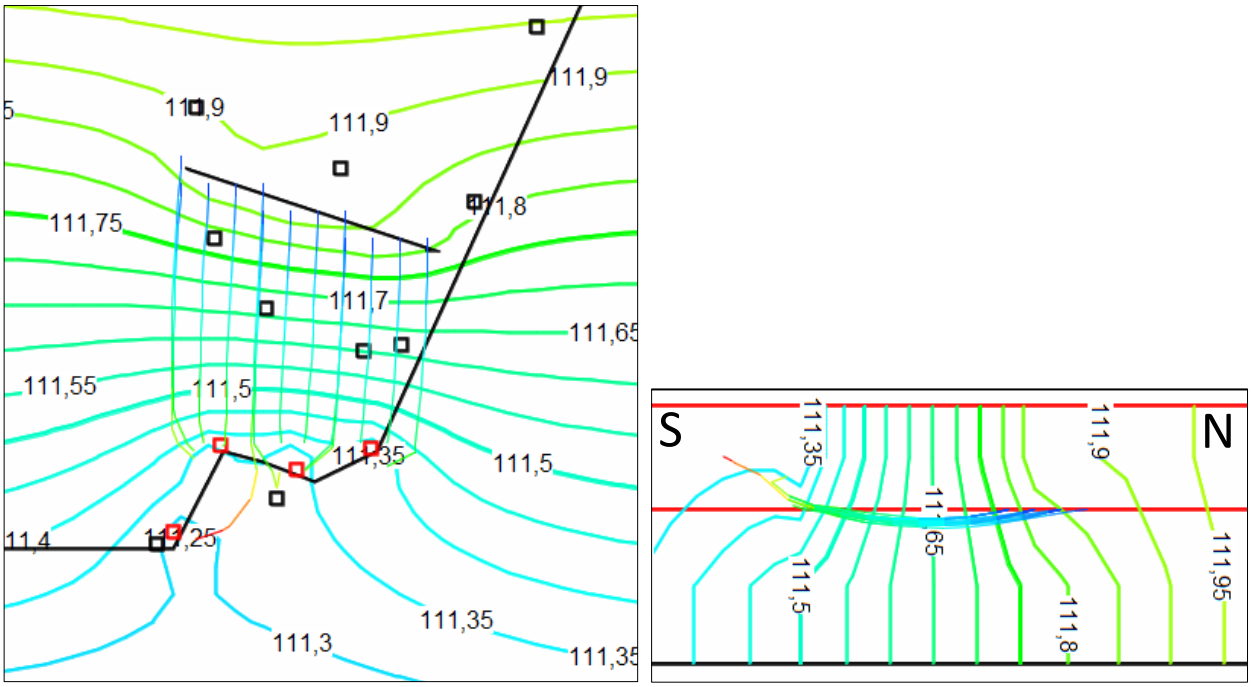



*Figura 11 – Verifica tramite modello di flusso della chiusura del sistema di ricircolo (a sx planimetria, a dx sezione longitudinale)*

### *6.4.3 Stima del fabbisogno di siero di latte e calcolo del dosaggio teorico*

La determinazione della massa di substrato organico (siero di latte) necessaria per l'attivazione e il mantenimento dei processi di bioriduzione in situ (ISBR) deriva da un bilancio di massa che tiene conto della domanda stechiometrica di elettroni, delle caratteristiche idrogeologiche del sito e delle cinetiche di degradazione biologica. Al fine di garantire che il substrato organico sia presente in eccesso rispetto alla domanda stechiometrica minima e possa distribuirsi uniformemente nell'area oggetto di trattamento, è stata fissata una **concentrazione target di TOC pari a 150 mg/l** all'interno del volume dei pori. Tale valore è stato individuato quale compromesso tra:

- Efficacia cinetica: Garantisce il mantenimento di un potenziale Redox costantemente inferiore a -150 mV;
- Sostenibilità idraulica: minimizza i rischi di bio-clogging (intasamento biologico) in prossimità dei punti di iniezione.

Sulla base del volume di acqua da trattare, definito al paragrafo precedente, e della concentrazione target di TOC, è possibile calcolare una massa totale di TOC pari a: 25.000mc * 0,15 kg/mc = **3750 kg di TOC**.



Considerando cautelativamente una concentrazione di TOC nel siero di latte (liquido, proveniente direttamente dal processo di caseificazione) pari a 30g/l, si prevede l'impiego di circa **125 tonnellate di siero per l'esecuzione di un ciclo di ricircolo**.

Al fine di mantenere una concentrazione di 150mg/l di TOC in una portata di ricircolo di 10mc/h, serve una portata pari a 1,5 kg/h di TOC. Pertanto, il **dosaggio teorico del siero nella linea di pozzi di iniezione** è:

Q = 1,5 kg/h / 0,03 kg/l = **50 litri / ora**

Il dosaggio effettivo del reagente deve però essere dimensionato non solo in funzione della portata di ricircolo, ma anche per compensare l'effetto di diluizione proveniente da monte e la domanda stechiometrica di donatori di elettroni del sistema acquifero. In considerazione di ciò, il sistema è tarato in via preliminare considerando un fattore di sicurezza (FS) pari a 1,2 e prevedendo, pertanto, una **portata di immissione iniziale pari a 60 litri/ora**. Tale valore verrà poi rifinito durante il test operativo di ottimizzazione di cui al paragrafo 6.3, sulla base dei profili di TOC rilevati nei piezometri di controllo.

Allo stesso modo, a seguito della fase di start-up (primi 4 mesi di intervento), che garantirà il primo ricircolo completo di acqua nel sistema e il raggiungimento delle condizioni red-ox ottimali per la riduzione del Cromo VI, il dosaggio di siero di latte potrà essere variato in base ai risultati dei monitoraggi eseguiti in corso di svolgimento dell'intervento.

### *6.4.4 Ubicazione e caratteristiche dei pozzi di iniezione*

Per la definizione del fronte di iniezione, è stato considerato in via preliminare un Raggio d'Influenza (ROI) dei pozzi pari a 7,5 m. Tale valore rappresenta una stima cautelativa derivante dalle proprietà idrogeologiche del sito e dalla portata di iniezione prevista, e potrà essere oggetto di affinamento nell'ambito del test operativo di ottimizzazione del sistema.

Al fine di garantire la formazione di un fronte riducente continuo e omogeneo, minimizzando i rischi di bypass legati ad eventuali eterogeneità locali della matrice acquifera, il sistema di iniezione sarà costituito da una **batteria di n. 12 pozzi**, ubicati a monte idrogeologico dell'area sorgente e disposti ortogonalmente alla direzione di deflusso della falda. I punti di immissione avranno un interasse di circa 10 metri, calcolato per garantire la completa sovrapposizione dei raggi d'influenza (ROI) indotti dalla pressione di esercizio. Con riferimento al layout riportato in Tavola 1, si evidenzia che n.3 dei pozzi di iniezione risultano interferenti con la ex palazzina uffici; pertanto, potranno essere realizzati solo a seguito della demolizione/revamping della stessa; nel caso in cui le attività di bonifica iniziassero prima di quelle edilizie, tali n.3 pozzi saranno integrati nella rete una volta completate queste attività. Sempre con riferimento al layout riportato in Tavola 1, sono

stati previsti ulteriori n.2 pozzi di iniezione da realizzarsi a monte della linea principale, che saranno attivati solo in caso di evidenze di contaminazione in PZ16.

Si prevede l'installazione di n. 12 pozzi di iniezione in PVC atossico per uso idropotabile (diametro min. 3''). Data l'omogeneità litologica attesa e l'obiettivo di un trattamento massivo dell'intero acquifero superficiale, i punti di immissione saranno dotati di finestratura continua di tipo microfessurato per l'intero spessore saturo (10m). Al fine di garantire una distribuzione radiale omogenea e contrastare i potenziali effetti di segregazione gravitativa del reagente, ogni pozzo sarà dotato di una testa stagna flangiata. L'iniezione avverrà in regime di pressione controllata, assicurando che il flusso di siero additivato interessi l'intera sezione filtrante, massimizzando il raggio d'influenza e garantendo la sovrapposizione dei fronti riducenti tra i pozzi adiacenti.



### *6.4.5 Dimensionamento e caratteristiche dell'impianto*

L'immissione della soluzione reagente avverrà in bassa pressione controllata; tale configurazione è stata preferita alla semplice immissione per gravità per garantire una diffusione radiale omogenea del substrato organico e per contrastare le perdite di carico locali dovute allo sviluppo della biomassa nel tempo.

Il sistema di stoccaggio, miscelazione e iniezione è dimensionato per garantire un'autonomia operativa di circa 10-12 giorni, ottimizzando la logistica dei rifornimenti. Di seguito si riportano le caratteristiche preliminari dell'impianto, che saranno affinate in fase di taratura:

- n. 1 serbatoio di stoccaggio del siero di latte, fuori terra in polietilene ad alta densità (HDPE) o analogo con capacità nominale di 15mc. Il serbatoio sarà dotato di:
    - Coibentazione termica per limitare i processi fermentativi precoci indotti dalle escursioni termiche;
    - Agitatore meccanico per prevenire la sedimentazione delle frazioni proteiche e garantire l'omogeneità del TOC;
    - Sfiato filtrato: sistema di abbattimento degli odori tramite filtri a carboni attivi;
    - Sensore di livello con trasmissione del segnale al PLC centrale per la gestione degli allarmi di "minimo livello" e "troppo pieno";
- Sistema di dosaggio e miscelazione in linea, costituito da:
    - N.2 pompe dosatrici (una di scorta) con portata regolabile, installata nel serbatoio di stoccaggio o in vasca adiacente dedicata;
    - Misuratore di portata installato sulla linea di mandata dell'acqua di ricircolo. Il PLC regolerà la frequenza di iniezione della pompa dosatrice in funzione della portata istantanea, mantenendo costante il rapporto di miscelazione;
    - Miscelatore statico installato a valle del punto di iniezione del reagente, necessario per garantire la perfetta miscelazione del siero prima della distribuzione ai singoli pozzi.

- Collettore di distribuzione e linee di mandata: la soluzione additivata verrà convogliata a un collettore di distribuzione in acciaio inox o HDPE, dal quale si dipartiranno le linee indipendenti dirette ai pozzi di iniezione. Ogni linea sarà equipaggiata con:
    - Valvola di intercettazione e regolazione per il bilanciamento manuale dei flussi verso i singoli pozzi;
    - Manometro analogico per il monitoraggio della pressione di esercizio;
    - Contatore volumetrico per la rendicontazione dei volumi di siero di latte immessi in ciascun pozzo.



Relativamente alle acque provenienti dal sistema di messa in sicurezza della falda, la separazione della portata emunta dalla barriera idraulica (14,4 mc/h) tra la linea di reiniezione (10 mc/h) e lo scarico in pubblica fognatura/CIS (4,4mc/h) avverrà tramite un **sistema di ripartizione in linea**, composto da uno collettore in acciaio inox o PEAD dotato di:

- Misuratore di portata posto sulla mandata generale per il monitoraggio del prelievo totale;
- Valvola motorizzata asservita al PLC di impianto, che regolerà automaticamente la quota parte destinata alla reiniezione in funzione della capacità di accettazione dei pozzi e del set-point di progetto (70%).
- Ramo di bypass verso CIS dotato di valvola di taratura e contatore volumetrico fiscale per la rendicontazione dei volumi scaricati.

Le tubazioni di mandata saranno posate fuori terra o all'interno di appositi cavidotti interrati e protette da guaine coibentate per garantire l'integrità meccanica e la protezione dal gelo.

L'intero processo sarà gestito da un quadro elettrico di comando dotato di PLC. Il sistema prevederà:

- Telecontrollo remoto: monitoraggio in tempo reale dei parametri operativi (portate, pressioni, livelli);
- Sicurezze intrinseche: blocco automatico delle pompe di iniezione in caso di sovrapressione (ostruzione valvole) o depressione (rottura tubazioni);
- Data logging: registrazione continua delle masse di reagente iniettate.

**Alla luce della portata di scarico in CIS prevista da progetto (4,4 mc/h, pari a 1,2 litri/secondo) superiore a quella attualmente autorizzata (1 litro/secondo), nell'ambito dell'autorizzazione all'esecuzione del presente Progetto di bonifica è da ricomprendersi anche l'adeguamento all'autorizzazione allo scarico attualmente in essere.**

### *6.4.6 Layout e P&I dell'impianto*

Il layout e il P&I preliminari dell'impianto sono rappresentati rispettivamente in Tavola 1 e 2.

La predisposizione dell'impianto di bonifica avverrà, con ogni probabilità, contestualmente alle attività di cantierizzazione dell'area nell'ambito del progetto edilizio di riqualificazione del sito. Con particolare riferimento ai pozzi di iniezione, si evidenzia che, come riportato in Tavola 1:

- n.3 pozzi risultano attualmente interferenti con la palazzina uffici e potranno essere realizzati e integrati nella rete solo a seguito della demolizione o revamping della stessa, secondo le previsioni del progetto di riqualificazione del sito;
- n.2 pozzi, ubicati più a nord rispetto alla linea di iniezione principale, sono stati previsti al fine di consentire un eventuale ampliamento futuro dell'impianto nel caso in cui si dovesse registrare un'estensione della contaminazione al piezometro PZ16, che ad oggi non ha mai mostrato concentrazioni di cromo VI eccedenti il limite di legge ma talora prossime allo stesso. I due pozzi e la relativa tubazione di mandata saranno predisposti in fase di realizzazione dell'impianto; si procederà all'effettivo allaccio e attivazione degli stessi solo in caso le evidenze dei monitoraggi futuri ne richiedessero la necessità.



**Si precisa che il layout riportato in Tavola 1 è stato definito tenendo in considerazione sia l'attuale stato dell'area che le previsioni di progetto, ma è ritenersi indicativo: l'esatta ubicazione degli elementi sarà definita in fase costruttiva in considerazione della logistica delle aree al fine di limitare le interferenze, garantendo la funzionalità del sistema secondo le logiche definite nel presente POB.** Inoltre, come già indicato, ubicazione e numero dei pozzi di emungimento e reimmissione potranno essere ridefiniti a seguito dei test operativi da eseguirsi preliminarmente all'intervento.

Allo stesso modo, il P&I proposto potrà essere oggetto di ottimizzazioni in fase costruttiva a seguito dell'affidamento dei lavori alla ditta specializzata che si occuperà dell'implementazione e gestione dell'impianto, sempre garantendo i principi e l'efficacia di trattamento descritti nel progetto.

Resta inteso che le specifiche definitive dell'impianto (layout, P&I, schede tecniche dei componenti, etc.) saranno rese disponibili agli Enti a seguito della realizzazione dello stesso.

## 6.5 Piano di monitoraggio

### *6.5.1 Monitoraggio impiantistico*

I parametri di riferimento per la gestione dell'impianto di bonifica sono i seguenti:

<u>Barriera idraulica:</u>

- Portata di emungimento in corrispondenza di ciascun pozzo;
- Pressione in/out filtri a resina;
- Verifica efficienza sistema di trattamento (analisi in/out sistema di trattamento);
- Verifica di conformità allo scarico in CIS (analisi Tab.3 D.Lgs.152/06).

<u>Impianto di ricircolo e iniezione:</u>

- Portata di ricircolo in corrispondenza di ciascun pozzo di iniezione;
- Dosaggio del siero di latte;

- Pressione di iniezione in corrispondenza di ciascuna testa pozzo;
- Livello di reagente in corrispondenza del serbatoio di stoccaggio del siero.

I parametri saranno valutati in continuo in automatico mediante invio segnale a PLC da parte dei sensori dedicati installati sulle linee dell'impianto, o tramite verifica di apposito operatore con cadenza almeno settimanale. Le verifiche analitiche saranno condotte con cadenza trimestrale.



### *6.5.2 Monitoraggio delle acque di falda*

Verranno eseguite verifiche chimiche e analitiche sulle acque prelevate dai piezometri di monitoraggio della rete esistente e dai pozzi barriera, al fine di valutare l'andamento della bonifica e il raggiungimento delle concentrazioni obiettivo.

Dal momento che l'area oggetto di bonifica è circoscritta a una limitata porzione del sito, i monitoraggi non interesseranno l'intera rete piezometrica di stabilimento ma unicamente i piezometri ubicati nell'area di interesse, e in adiacenza alla stessa. In particolare, con riferimento alla Figura 3:

- PZ4
- PZVALLE
- PZ13
- PZ1
- PZ10
- PZ11
- PZ12
- PZ9
- PZ16
- PZ17
- PZ18
- PZ20

Inoltre, saranno oggetto di monitoraggio le acque prelevate dai pozzi della barriera idraulica.

I monitoraggi si svolgeranno con le modalità indicate nella seguente tabella.

| | | FREQUENZA | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Frequenza prima dell'avvio dell'intervento di bonifica (Fase 1)** | **Frequenza fase di start-up dell'intervento di bonifica (Fase 2)** | **Frequenza fase di regime dell'intervento di bonifica (Fase 3)** | **Frequenza fase di verifica effetti rebound (Fase 4)** |
| **SET ANALITICO** | **Cromo VI, Cromo tot.** | Trimestrale | | | |
| | **Cromo VI, Cromo tot., TOC, Nitrati, Solfati, Ferro, Manganese** | | Quindicinale | Mensile | Bimestrale |



Nel corso delle campagne di monitoraggio si procederà, inoltre, al rilievo dei parametri chimico-fisici di campo (pH, conducibilità elettrica, potenziale redox, ossigeno disciolto) e della soggiacenza della falda in ciascun punto, al fine di ricostruire il campo di moto della falda.

Le acque di spurgo dei piezometri saranno gestite mediante rilancio diretto alla vasca di testa dell'impianto TAF.

### *6.5.3 Rendicontazione monitoraggi*

Con cadenza trimestrale si procederà alla trasmissione di report agli Enti, illustrativi dello stato di avanzamento delle attività di bonifica. I report comprenderanno:

- Rendicontazione delle attività di bonifica (parametri operativi dell'impianto, quantità di siero di latte iniettato, etc.);
- Eventuali aggiustamenti / tarature operative impiantistiche effettuate;
- Risultati dei monitoraggi impiantistici;
- Risultati dei monitoraggi delle acque di falda.

## 6.6 Cronoprogramma

La durata complessiva del progetto di bonifica è stimata in 24 mesi, ipotizzando la necessità di completare almeno 2,5 cicli di ricambio del volume dei pori per stabilizzare la riduzione del Cromo VI.

L'intervento sarà articolato nelle seguenti fasi:

- Fase 1*: implementazione barriera idraulica, esecuzione del test operativo di ottimizzazione e installazione impianto di bonifica (mesi 1-5)
- Fase 2: avvio bonifica: fase di start-up (mesi 6-9)
- Fase 3: prosecuzione bonifica a regime (mesi 10-18)
- Fase 4: monitoraggi di verifica effetti rebound (mesi 19-24)

***NB**: la fase 1 sarà subito implementata a seguito dell'ottenimento dell'autorizzazione all'esecuzione dell'intervento di bonifica da parte del Comune di Treviglio. **Le fasi successive saranno avviate solo nel caso in cui le risultanze dei monitoraggi periodici di cui al paragrafo 6.5 mostrassero evidenza di contaminazione da Cromo VI.**

Nel caso in cui al termine dei monitoraggi di fase 4 si registrassero concentrazioni di Cromo VI conformi all'obiettivo di bonifica (CSC Tab.2 al punto di conformità) si procederà all'esecuzione di una campagna di monitoraggio in contraddittorio con ARPA finalizzata al collaudo finale dell'intervento e alla successiva certificazione di avvenuta bonifica del sito.

Nel caso in cui, al termine della Fase 3 (bonifica a regime) o della Fase 4 (verifica rebound) si registrassero concentrazioni residue non conformi al limite si procederà, in accordo con gli Enti, alla prosecuzione delle attività di iniezione senza che ciò costituisca variante del presente progetto, ovvero alla presentazione di una variante al POB per illustrare una nuova proposta progettuale.

| FASI | ANNI: | ANNO 1 | | | | | | | | | | | | ANNO 2 | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MESI: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | Implementazione barriera idraulica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Installazione campo prova | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Esecuzione test operativo di ottimizzazione | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Taratura finale impianto di bonifica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Installazione impianto di bonifica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | Esecuzione intervento di bonifica (fase di start-up) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | Esecuzione intervento di bonifica (a regime) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | Verifica effetti rebound | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Chiusura intervento di bonifica | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Monitoraggi periodici falda | X | | | X | | XX | XX | XX | XX | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | X | | X | |

## 6.7 Computo metrico estimativo

Di seguito si riporta il computo metrico estimativo per la realizzazione dell'intervento.

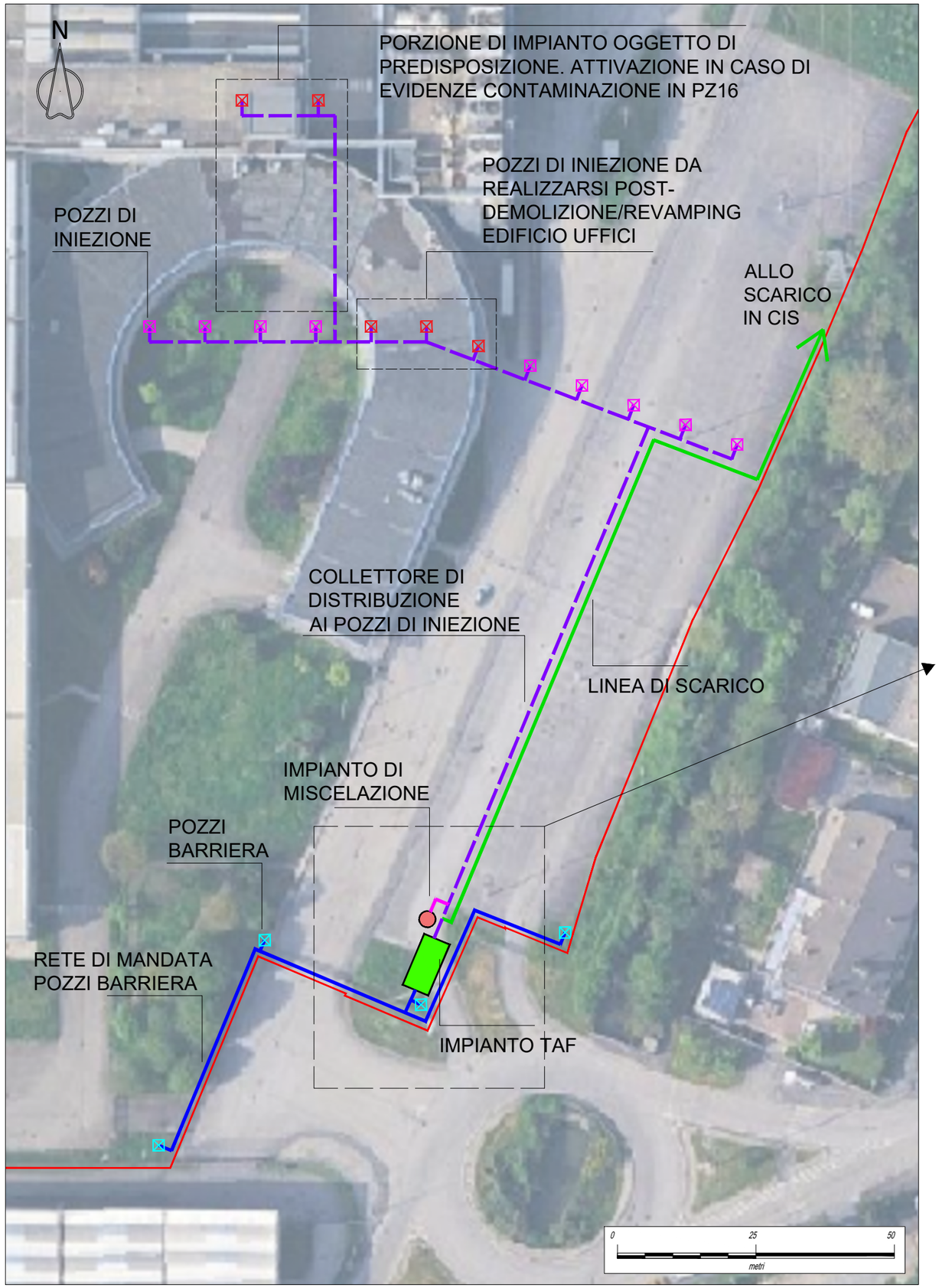
| | |
|---|---|
| **Implementazione barriera idraulica:**<br>- Realizzazione n.4 pozzi<br>- Installazione pompe di emungimento e attrezzature elettromeccaniche<br>- Realizzazione prove di pompaggio<br>- Ricalibrazione modello di flusso | 88.000,00 € |
| **Test operativo di ottimizzazione:**<br>- Perforazione piezometri del campo prova<br>- Fornitura e stoccaggio del siero di latte<br>- Esecuzione dei test pilota<br>- Monitoraggio periodico della falda<br>- Assistenza tecnica e report finale | 41.000,00 € |
| **Implementazione impianto TAF:**<br>- Realizzazione impianto TAF secondo le specifiche di progetto, compreso sistema controllo / PLC | 550.000,00 € |
| **Reti idrauliche:**<br>- Installazione reti di mandata delle acque con coibentazione | 65.000,00 € |
| **Sistema di iniezione:**<br>- Perforazione n.14 pozzi di iniezione<br>- Realizzazione sistema di iniezione come da specifiche di progetto, comprensivo di serbatoio accumulo coibentato, sistema dosaggio e miscelazione, collettore di distribuzione<br>- Fornitura siero di latte nei quantitativi previsti da progetto | 328.000,00 € |
| **Monitoraggi:**<br>- Monitoraggio TAF<br>- Analisi di conformità allo scarico in CIS<br>- Monitoraggio periodico della falda secondo le specifiche di progetto | 81.000,00 € |
| **Ingegneria:**<br>- Gestione e manutenzione periodica dell'istanza<br>- Assistenza nell'ambito del procedimento ambientale<br>- Reportistica periodica | 69.000,00 € |
| **Oneri della sicurezza:** | 37.000,00 € |

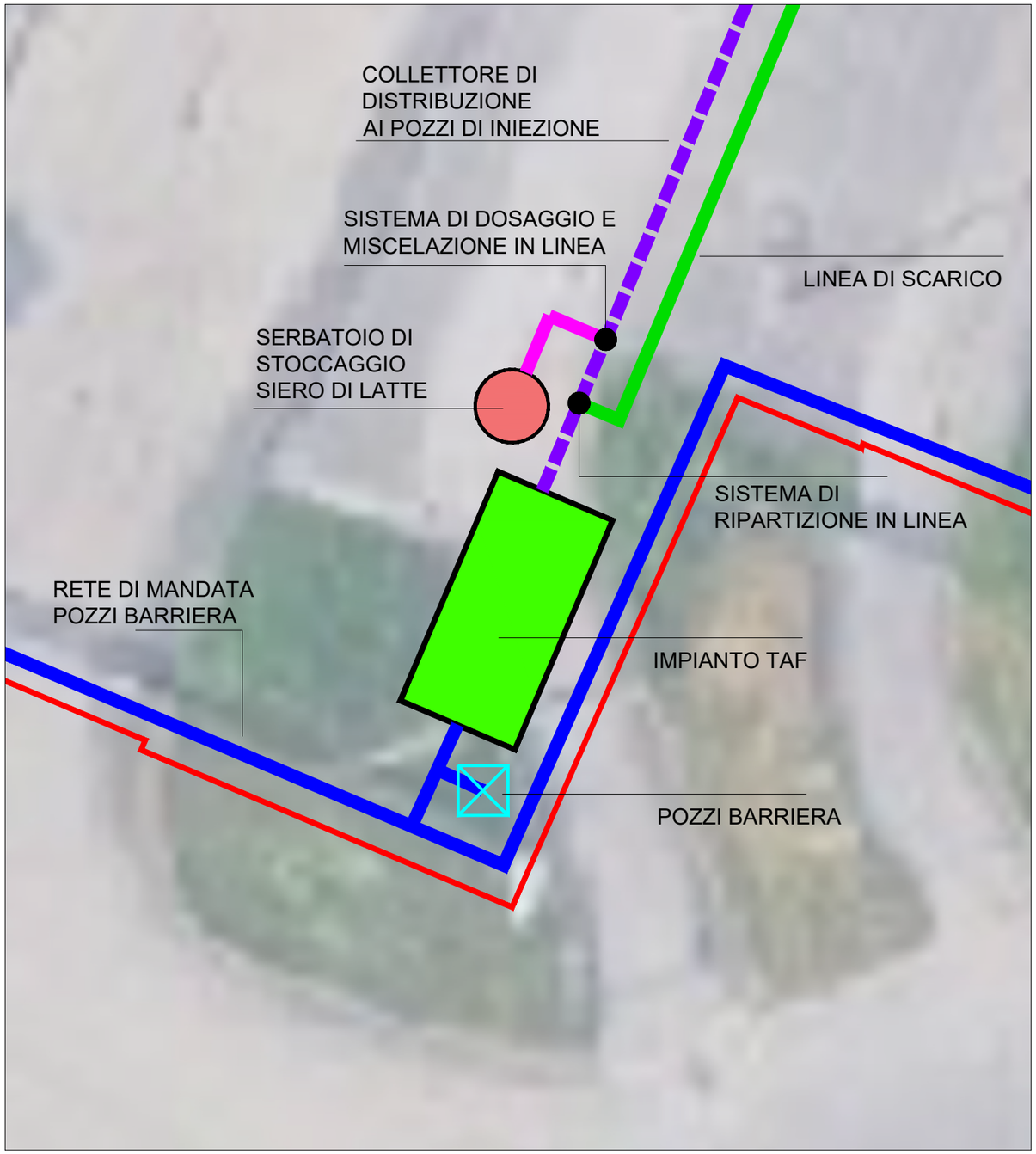
**Totale: 1.259.000,00 €**

Esclusioni:

- Eventuali opere civili (scavi, rinterri, fondazioni, pozzetti/camerette di avanpozzo);
- Eventuale sistema di rigenerazione delle resine e dei carboni attivi
- Eventuale sostituzione periodica delle resine e dei carboni attivi
- Consumi elettrici

# TAVOLE

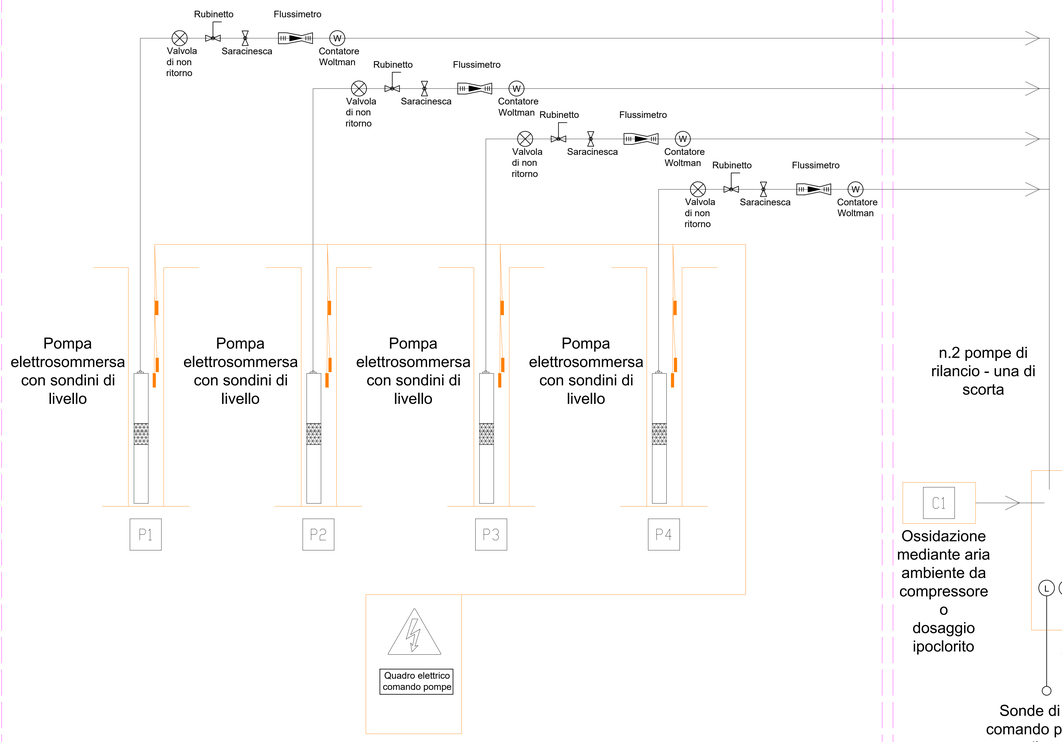


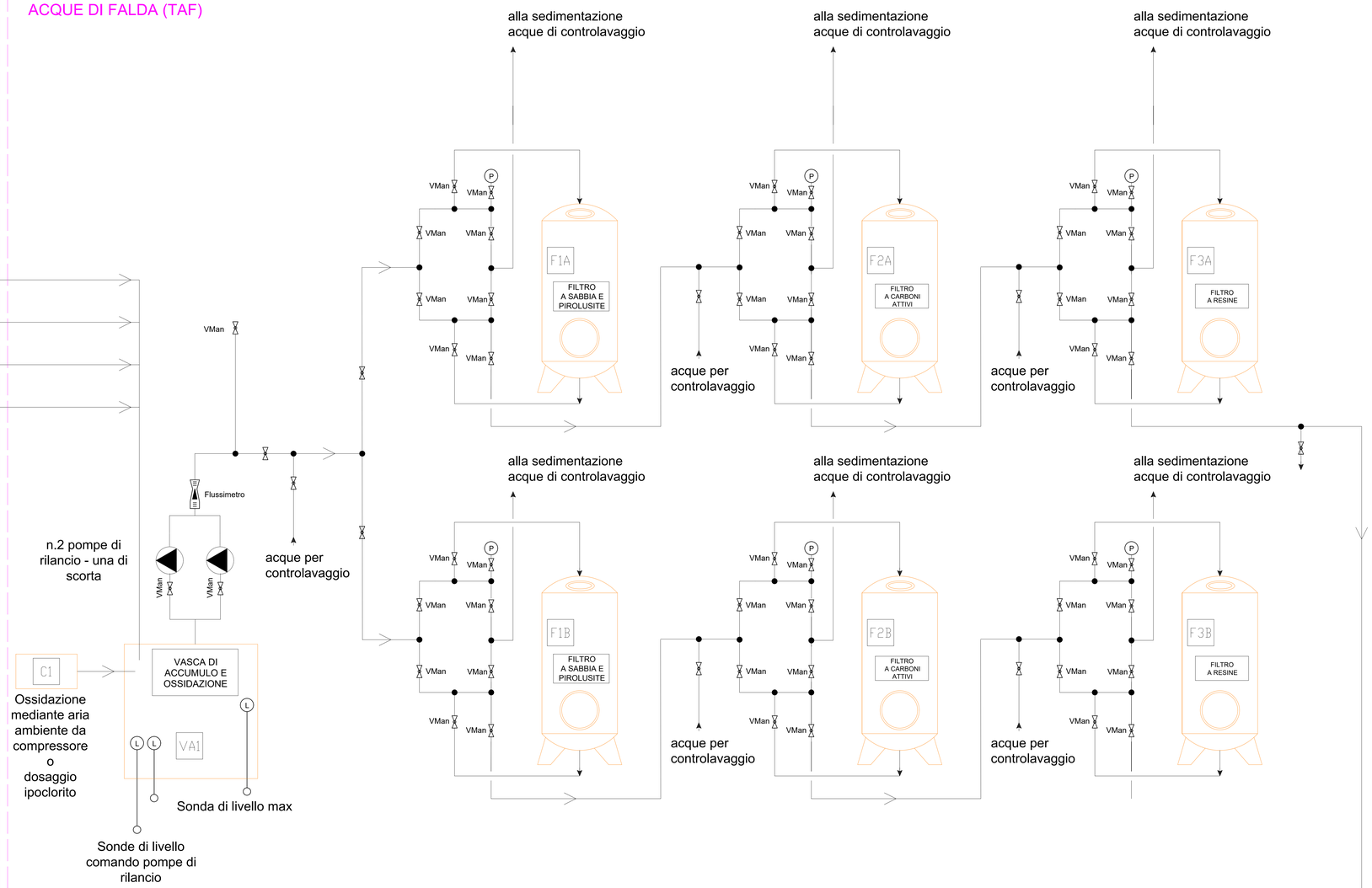

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | LP | MAU | MAU |
| 0 | 18.06.2026 | | dis. | contr. | appr. |
| revisione | data | modifiche | commessa: 25.070.01 | data: 18/06/2026 | tavola: 1 |
| oggetto: Area ex Elcograf di Treviglio (BG) Progetto Operativo di Bonifica delle acque di falda | | disegnato per: Lombardini 22 S.p.A. | scala: GRAFICA | foglio: A3 | |
| | | | file: 25.070.01.TAV.1 | | |
| titolo: LAYOUT DELL'IMPIANTO | | | Alvea Environment, Your Next Asset | | |

E' vietata ogni riproduzione totale o parziale della presente documentazione senza autorizzazione scritta degli Autori e della Proprietà

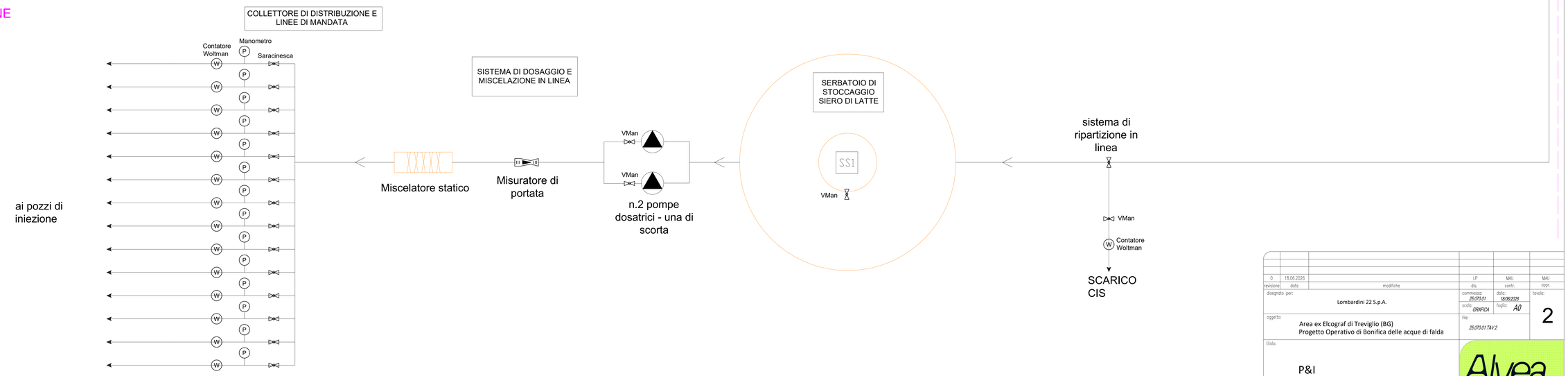
## SISTEMA DI EMUNGIMENTO - BARRIERA IDRAULICA




## IMPIANTO TRATTAMENTO ACQUE DI FALDA (TAF)




## IMPIANTO DI MISCELAZIONE E RE-IMMISSIONE




| revisione | data | modifiche | dis. | confr. | appr. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 18.06.2026 | | LP | MAU | MAU |

disegnato per: Lombardini 22 S.p.A.

commessa: 25.070.01 | data: 18/06/2026 | scala: GRAFICA | foglio: A0 | tavola: 2

oggetto: Area ex Elcograf di Treviglio (BG)
Progetto Operativo di Bonifica delle acque di falda

file: 25.070.01.TAV.2

titolo: P&I

Alvea — Environment, Your Next Asset

E' vietata ogni riproduzione totale o parziale della presente documentazione senza autorizzazione scritta degli Autori e della Proprietà

2

# ALLEGATI

# ALLEGATO 1

Analisi di Rischio sito-specifica (ambiente srl, febbraio 2026)

# ALLEGATO 2

Report della campagna di monitoraggio delle acque di falda di gennaio 2026 (ambiente srl, febbraio 2026)

# ALLEGATO 3

Realizzazione prova di pompaggio (ambiente srl, febbraio 2026)